

Maria Cecília Marques Rodrigues

MODELAÇÃO DE UM SISTEMA DE ALARME SÍSMICO
PARA A PENÍNSULA IBÉRICA

Lisboa
1998

copyright

Maria Cecília Marques Rodrigues

MODELAÇÃO DE UM SISTEMA DE ALARME SÍSMICO PARA
A
PENÍNSULA IBÉRICA

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de
Doutor em Matemática - Investigação Operacional pela
Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e
Tecnologia.

Lisboa

1998

A todos os meus Amigos

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Ruy Costa, agradeço a orientação, críticas e sugestões que enriqueceram esta Dissertação, bem como todo o encorajamento essencial à realização deste trabalho.

Agradeço também ao Professor Doutor Carlos Sousa Oliveira (IST) por ter cedido os dados que constituem o Catálogo Sísmico utilizado neste trabalho, e pelas sugestões que enriqueceram este trabalho.

Ao Departamento de Matemática da Faculdade de Ciências e Tecnologia agradeço a dispensa de serviço docente que me foi concedida durante três anos, indispensável à execução desta Dissertação.

Agradeço ao Centro de Matemática e Aplicações o acesso a material informático e bibliográfico, bem como o apoio prestado na minha participação em encontros científicos.

Ao CESUR e ao IST agradeço o acesso à biblioteca.

Agradeço ainda a todo o pessoal do Departamento de Matemática, aos meus familiares e amigos, que me encorajaram e mostraram interesse por este trabalho.

Sumário

Modelou-se um Sistema de Alarme Sísmico para a Península Ibérica que, em função da situação sísmica dada, permite determinar o *Grau de Alarme Sísmico*, para uma região, durante um determinado horizonte temporal.

Utilizaram-se dois precursores sísmicos:

- as *condições iniciais* do modelo de simulação utilizado para gerar o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, que corresponde ao passado sísmico recente;
- a *Sismicidade Local*, ou seja o número de ocorrências sísmicas de qualquer magnitude, registadas na região em estudo, durante um período de tempo.

Com base na Teoria dos Conjuntos Vagos, determinou-se o grau de alarme relativo a cada um dos precursores utilizados. A média pesada dos valores de grau de alarme origina o *Grau de Alarme Sísmico*. Os 'pesos' envolvidos nessa média foram obtidos com recurso à metodologia AHP, tomando como critérios, as percentagens de sismos previstos (ou de falhas), falsos alarmes e tempo de alarme.

O Sistema desenvolvido foi calibrado com base em 12 situações sísmicas reais ocorridas na Península Ibérica.

Abstract

A Seismic Alarm System for the Iberian Peninsula was proposed. Given the seismic situation of one zone, the seismic state, for that zone and one time-window is computed.

Two precursors were considered:

- *Initial conditions* of the simulation model used to generate the process of occurrences on the Iberian Peninsula, describe the recent seismic past;
- *Local seismicity* - number of occurrences of any magnitude - for a given zone and time-window.

Fuzzy Set Theory was used to assess the alarm state of each precursor. A weighted average of the alarm state of each of precursor is used to computed the global alarm state. The weights involved were computed using the AHP methodology - the percentages of predicted occurrences (or missed), false alarms and alarm life time were the criteria.

Twelve real seismic sets of data were used to calibrate the system.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1- INTRODUÇÃO	pag.
1.1 - Introdução	1
1.2 - Sistemas de Alarme Sísmico - Uma Panorâmica	3
1.2.1 - Métodos Físicos de Previsão Sísmica	5
1.2.1.1 - Variações das quantidades de Radão dissolvido na água dos poços profundos	5
1.2.1.2 - Variações na relação v_P/v_S	6
1.2.1.3 - Variações da resistividade eléctrica da crosta terrestre	6
1.2.1.4 - Técnicas Geodésicas	7
1.2.1.5 - Modelo de difusão por dilatância	7
1.2.1.6 - Outros Métodos Físicos	8
1.2.2 - Métodos Numéricos de Previsão Sísmica	10
1.3 - Estrutura da Dissertação	11
 2 - METODOLOGIA	
2.1 - Métodos utilizados	15
2.1.1 - Geração de valores pseudo-aleatórios	15
2.1.2 - Geração do processo de ocorrências sísmicas	17
2.1.3 - AHP -The Analytic Hierarchy Process	24
2.1.4 - Teoria dos Conjuntos Vagos	27
2.2 - Dados disponíveis	28
2.3 - Metodologia proposta para um Sistema de Alarme Sísmico	31
2.4 - Conclusão	34

3 - ANÁLISE DO PRECURSOR CONDIÇÕES INICIAIS	pag.
3.1 - Introdução	37
3.2 - Estudo comparativo de condições iniciais arbitradas	44
3.2.1- Experiências efectuadas	47
3.2.2 - Análise de resultados	55
3.2.3 - Conclusões	62
3.3 - Estudo da influência de condições iniciais geradas aleatoriamente	63
3.3.1 - Experiências efectuadas	67
3.3.2 - Análise de resultados	78
3.3.3 - Conclusões	83
3.4 - Conclusão	84
 4 - ANÁLISE DO PRECURSOR SISMICIDADE LOCAL	
4.1 Introdução	87
4.2 Sismicidade Local	88
4.2.1 - Experiências efectuadas	91
4.2.2 - Análise de resultados	95
4.3 Conclusão	96
 5 - GRAU DE ALARME DO PRECURSOR CONDIÇÕES INICIAIS	
5.1 - Introdução	97
5.2 - Grau de alarme do precursor Condições Iniciais	98
5.2.1 - Experiências efectuadas	112
5.2.1.1 - Experiências com Condições Iniciais reais	113
5.2.1.2 - Experiências com Condições Iniciais fictícias	120
5.2.1.2.1 - Caracterização de cenários sísmicos fictícios	120
5.2.1.2.2 - Análise de resultados	124
5.3 - Conclusão	127

6 - GRAU DE ALARME DO PRECURSOR SISMICIDADE LOCAL pag.

6.1 - Introdução	129
6.2 - Grau de alarme associado ao precursor Sismicidade Local	130
6.2.1 - Experiências efectuadas	136
6.2.2 - Análise de resultados	139
6.3 - Conclusão	140

7 - MEDIDAS DE DESEMPENHO DOS PRECURSORES SÍSMICOS

7.1 - Introdução	141
7.2 - Medidas de desempenho do precursor Condições Iniciais	142
7.2.1 - Experiências efectuadas	146
7.2.2 - Análise de resultados	152
7.3 - Medidas de desempenho do precursor Sismicidade Local	153
7.3.1 - Experiências efectuadas	154
7.3.2 - Análise de resultados	159
7.4 - Conclusão	161

8 - GRAU DE ALARME SÍSMICO

8.1 - Introdução	163
8.2 - Determinação do Grau de Alarme Total	167
8.2.1 - Experiências efectuadas	169
8.2.2 - Análise de resultados	176
8.2.2.1 - Análise de Sensibilidade	177
8.3 - Conclusão	180

9 - CONCLUSÃO	pag.
9.1 - Introdução	181
9.2 - Limitações	183
9.3 - Potencialidades	184
9.4 - Desenvolvimentos	185
 ANEXO A	 189
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 217

ÍNDICE DE FIGURAS

	pag.
1.1.1 - Representação de um Sistema de Alarme Sísmico	3
2.1.2.1 - Zonas sísmicas da Península Ibérica	18
2.1.2.2 - Fluxograma representativo da simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica	20
2.1.2.3 - Amplitude do intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, para um período de tempo de 7 dias, em função do número de simulações	22
2.1.2.4 - Amplitude do intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, para um período de tempo de 15 dias, em função do número de simulações	22
2.1.2.5 - Coeficiente de variação do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, para a região de Lisboa, em função do número de simulações	22
2.1.2.6 - Amplitude do intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região da Andaluzia, para um período de tempo de 7 dias, em função do número de simulações	23
2.1.2.7 - Amplitude do intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região da Andaluzia, para um período de tempo de 15 dias, em função do número de simulações	23
2.1.2.8 - Coeficiente de variação do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, para a região da Andaluzia, em função do número de simulações	23
2.1.3.1 - Exemplo de hierarquia linear	25
2.3.1 - Representação do Sistema de Alarme Sísmico proposto	32

3.2.1.1 - Vectores de prioridades para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $4 \leq G < 5$	53
3.2.1.2 - Vectores de prioridades para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $G \geq 5$	53
3.2.1.3 - Vectores de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $4 \leq G < 5$	54
3.2.1.4 - Vectores de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $G \geq 5$	54
3.2.2.1 - Intervalo de confiança para a proporção de sismos com magnitude $4 \leq G < 5$	60
3.2.2.2 - Intervalo de confiança para a proporção de sismos com magnitude $G \geq 5$	60
3.2.2.3 - Intervalo de confiança para a proporção de sismos com magnitude $4 \leq G < 5$	61
3.2.2.4 - Intervalo de confiança para a proporção de sismos com magnitude $G \geq 5$	61
3.3.1.1 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, durante um período de tempo de 7 dias	69
3.3.1.2 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Andaluzia, durante um período de tempo de 7 dias	69
3.3.1.3 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, durante um período de tempo de 15 dias	70

pag.

3.3.1.4 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Andaluzia, durante um período de tempo de 15 dias	70
3.3.1.5 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, durante um período de tempo de 30 dias	71
3.3.1.6 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Andaluzia, durante um período de tempo de 30 dias	71
3.3.1.7 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, durante um período de tempo de 90 dias	72
3.3.1.8 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Andaluzia, durante um período de tempo de 90 dias	72
3.3.1.9 - Vectores de prioridades para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $G \geq 4$	73
3.3.1.10 - Vectores de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $G \geq 4$	73
3.3.1.11 - Vectores de prioridades para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $4 \leq G < 5$	76
3.3.1.12 - Vectores de prioridades para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $G \geq 5$	76
3.3.1.13 - Vectores de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $4 \leq G < 5$	77

3.3.1.14 - Vectores de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $G \geq 5$	77
4.2.1 - Número de ocorrências sísmicas em períodos de 5 anos na região de Lisboa	89
4.2.2 - Número de ocorrências sísmicas em períodos de 5 anos na região da Andaluzia	89
4.2.3 - Representação esquemática do processo de ocorrências sísmicas numa determinada zona	90
4.2.1.1 - Histograma de frequências relativas de Dtr, para a região de Lisboa	92
4.2.1.2 - Histograma de frequências relativas de Dtr, para a região da Andaluzia	93
4.2.1.3 - Valor médio de Dtr durante os períodos de tempo T0 que precederam sismos de média e forte magnitude, na região de Lisboa	94
4.2.1.4 - Valor médio de Dtr durante os períodos de tempo T0 que precederam sismos de média e forte magnitude, na região da Andaluzia	95
5.2.1 - Domínio de variação provável de \bar{s}	104
5.2.2 - Exemplo de representação gráfica da função pertença de um conjunto vago	107
5.2.3 - Representação gráfica da função pertença dos conjuntos vagos associados a ga_{CI}	108
5.2.4 - Conjunto vago de saída	110
5.2.15 - Representação esquemática do Sistema de Controlo Vago para as condições iniciais	111

5.2.1.1.1 - Representação gráfica da função pertença dos conjuntos vagos associados às condições iniciais para a região de Lisboa, para horizontes temporais de 7 e 15 dias	118
5.3.1 - Relação de \bar{s} com ga_{CI}	127
6.2.1 - Domínio de variação provável da Sismicidade Local	131
6.2.2 - Representação gráfica da função pertença dos conjuntos vagos associados à Sismicidade Local	132
6.2.3 - Representação gráfica da função pertença dos conjuntos vagos associados a ga_{SL}	133
6.2.4 - Representação esquemática do Sistema de Controlo Vago para o precursor Sismicidade Local	135
6.2.1.4 - Representação gráfica da função pertença dos conjuntos vagos associados à Sismicidade Local, para as regiões de Lisboa e Andaluzia e horizontes temporais de 7, 15 e 30 dias	139
7.2.1 - Subdivisão de Dt, G e E, com vista à avaliação da “proximidade” de um cenário a uma condição inicial	144
7.2.1.1 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias	148
7.2.1.2 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 15$ dias	148
7.2.1.3 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 30$ dias	149

7.2.1.4 - Valores de q para a região de Lisboa	149
7.2.1.5 - Valores de U para a região de Lisboa	149
7.2.1.6 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias	150
7.2.1.7 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias	150
7.2.1.8 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 30$ dias	151
7.2.1.9 - Valores de q para a região da Andaluzia	151
7.2.1.10 - Valores de U para a região da Andaluzia	151
7.3.1.1 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias	156
7.3.1.2 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 15$ dias	156
7.3.1.3 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 30$ dias	156
7.3.1.4 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias	157
7.3.1.5 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias	157
7.3.1.6 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 30$ dias	157

7.3.1.7 - Valores de q , para a região de Lisboa	158
7.3.1.8 - Valores de U , para a região de Lisboa	158
7.3.1.9 - Valores de q , para a região da Andaluzia	158
7.3.1.10 - Valores de U , para a região da Andaluzia	159
8.2.1 - Hierarquia representativa da atribuição das factores de ponderação do grau de alarme relativo a cada precursor	168
8.2.2.1 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de falhas	178
9.1.1 - Representação global do Sistema de Alarme Sísmico, com referência às metodologias utilizadas	182
A.1- Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de falsos alarmes	191
A.2 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	192
A.3 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 15$ dias, para o critério percentagem de falhas	193
A.4 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 15$ dias, para o critério percentagem de falsos alarmes	194

A.5 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	195
A.6 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falhas	196
A.7 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes	197
A.8 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	198
A.9 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falhas	199
A.10 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem falsos alarmes	200
A.11 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	201
A.12 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falhas	202
A.13 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes	203

pag.

A.14 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	204
A.15 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falhas	205
A.16 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes	206
A.17 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	207
A.18 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falhas	208
A.19 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes	209
A.20 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	210
A.21 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falhas	211
A.22 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes	212

A.23 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	213
A.24 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 6, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falhas	214
A.25 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 6, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes	215
A.26 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade local, da situação sísmica nº 6, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme	216

ÍNDICE DE QUADROS

	pag.
2.1.3.1 - Escala de comparações utilizada na teoria AHP	26
2.2.1 - Algumas características dos registos posteriores a 1900	29
2.2.2 - Número de registos posteriores a 1900, com informação relativa às duas últimas ocorrências	30
2.3.1 - Estatísticas de ocorrências sísmicas, na Península Ibérica e nas duas regiões estudadas	34
3.1.1 - Possibilidades de combinações de parâmetros	41
3.2.1.1 - Estatísticas de Dt e G	48
3.2.1.2 - Primeiro conjunto de condições iniciais utilizado para a região de Lisboa	49
3.2.1.3 - Segundo conjunto de condições iniciais utilizado para a região de Lisboa	49
3.2.1.4 - Terceiro conjunto de condições iniciais utilizado para a região de Lisboa	49
3.2.1.5 - Primeiro conjunto de condições iniciais utilizado para a região da Andaluzia	50
3.2.1.6 - Segundo conjunto de condições iniciais utilizado para a região da Andaluzia	50
3.2.1.7 - Terceiro conjunto de condições iniciais utilizado para a região da Andaluzia	50
3.2.1.8 - Vectores de prioridades para a Região de Lisboa	52
3.2.1.9 - Vectores de prioridades para a Região da Andaluzia	52
3.2.2.1 - Representação esquemática das componentes dos vectores de prioridades para sismos de média magnitude na Região de Lisboa	56
3.2.2.2 - Representação esquemática das componentes dos vectores de prioridades para sismos de média magnitude na Região da Andaluzia	56

3.2.2.3 - Representação esquemática das componentes dos vectores de prioridades para sismos de forte magnitude na região de Lisboa	57
3.2.2.4 - Representação esquemática das componentes dos vectores de prioridades para sismos de forte magnitude na Região da Andaluzia	57
3.2.2.5 - Probabilidade de ocorrência de um sismo forte na região de Lisboa (em %)	58
3.2.2.6 - Resultados do ajustamento linear efectuado para a região de Lisboa	59
3.2.2.7 - Probabilidade de ocorrência de um sismo forte na região da Andaluzia (em %)	59
3.2.2.8 - Resultados do ajustamento linear efectuado para a região da Andaluzia	59
3.3.1.1 - Representação esquemática das condições iniciais comparadas	68
3.3.1.2 - Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% para a média de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4, durante um período de tempo de 7 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia	69
3.3.1.3 - Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% para a média de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4, durante um período de tempo de 15 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia	70
3.3.1.4 - Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% para a média de de magnitude superior ou igual a 4, durante um período de tempo de 30 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia	71
3.3.1.5 - Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% para a média de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4, durante um período de tempo de 90 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia	72
3.3.1.6 - Valor médio do número de ocorrências de média e forte magnitude, durante um período de tempo de 7 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia	74

3.3.1.7 - Valor médio do número de ocorrências de média e forte magnitude, durante um período de tempo de 15 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia	74
3.3.1.8 - Valor médio do número de ocorrências de média e forte magnitude, durante um período de tempo de 30 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia	74
3.3.1.9 - Valor médio do número de ocorrências de média e forte magnitude, durante um período de tempo de 90 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia	74
3.3.1.10 - Vectores de prioridades para a Região de Lisboa	75
3.3.1.11 - Vectores de prioridades para a Região da Andaluzia	75
3.3.2.1 - Representação esquemática das componentes dos vectores de prioridades para a Região de Lisboa	78
3.3.2.2 - Representação esquemática das componentes dos vectores de prioridades para a Região da Andaluzia	79
3.3.2.3 - Valores de \bar{s} para a região de Lisboa	81
3.3.2.4 - Valores de \bar{s} para a região da Andaluzia	81
3.3.2.5 - Resultados do ajustamento linear efectuado para a região de Lisboa	82
3.3.2.6 - Resultados do ajustamento linear efectuado para a região da Andaluzia	82
3.4.1 - Síntese das experiências efectuadas no estudo das condições iniciais	84
4.2.1.1 - Estatísticas de Dtr, para as regiões de Lisboa e Andaluzia	91
4.2.1.2 - Valor médio de Dtr durante o período de tempo T0 que precedeu sismos de média e forte magnitude, nas regiões de Lisboa e Andaluzia	94
5.2.1 - Valores mínimo e máximo de Dt (em anos) e G (mag. Richter) observados na Península Ibérica	99

5.2.2 - Valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4.0, para períodos de 7 dias, em função de E_{i-1} , para as situações A e B	101
5.2.3 - Valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4.0, para períodos de 15 dias, em função de E_{i-1} , para as situações A e B	102
5.2.4 - Condições iniciais correspondentes a \bar{s} min e \bar{s} max	102
5.2.5 - Valores médios e desvios padrões, correspondentes às situações A e B	103
5.2.1.1 - Determinação do intervalo $[Li, Ls]$ para as regiões de Lisboa e Andaluzia, para horizontes temporais de 7 e 15 dias	112
5.2.1.1.1 - Condições iniciais reais experimentadas para a região de Lisboa	113
5.2.1.1.2 - Condições iniciais reais experimentadas para a região da Andaluzia	114
5.2.1.1.3 - Resultados obtidos para as condições iniciais reais experimentadas para a região de Lisboa e da Andaluzia, para $T0 = 7$ dias	114
5.2.1.1.4 - Resultados obtidos para as condições iniciais reais experimentadas para a região de Lisboa e da Andaluzia, para $T0 = 15$ dias	114
5.2.1.1.5 - Valores obtidos de \bar{s} e \bar{s} norm	115
5.2.1.1.6 - Sistema de pontuação utilizado para a calibração da variável centro, para o precursor Condições Iniciais	115
5.2.1.1.7 - Valores de ga_{CI} para os três valores do centro experimentados, para $T0 = 7$ dias	116

5.2.1.1.8 - Valores de pontuação para os três valores do centro experimentados, para $T_0 = 7$ dias	116
5.2.1.1.9 - Valores de ga_{CI} para os três valores do centro experimentados, para $T_0 = 15$ dias	117
5.2.1.1.10 - Valores de pontuação para os três valores do centro experimentados, para $T_0 = 15$ dias	117
5.2.1.1.11 - Grau de alarme para as condições iniciais reais experimentadas para a região de Lisboa, para períodos de 7 e 15 dias, bem como o grau de activação (em %) de cada uma das regras R1, R2 e R3	118
5.2.1.1.12 - Grau de alarme para as condições iniciais reais experimentadas para a região da Andaluzia, para períodos de 7 e 15 dias, bem como o grau de activação (em %) de cada uma das regras R1, R2 e R3	119
5.2.1.2.1.1 - Número de ocorrências em cada zona sísmica da Península Ibérica	121
5.2.1.2.1.2 - Cenários sísmicos estudados	122
5.2.1.2.1.3 - Resultados obtidos para as condições iniciais geradas aleatoriamente, para $T_0 = 7$ dias	122
5.2.1.2.1.4 - Resultados obtidos para as condições iniciais geradas aleatoriamente, para $T_0 = 15$ dias	123
5.2.1.2.1.5 - Grau de alarme para as condições iniciais arbitradas para a região de Lisboa, para períodos de 7 e 15 dias, bem como o grau de activação (em %) de cada uma das regras R1, R2 e R3	123
5.2.1.2.1.6 - Grau de alarme para as condições iniciais arbitradas para a região da Andaluzia, para períodos de 7 e 15 dias, bem como o grau de activação (em %) de cada uma das regras R1, R2 e R3	124

5.2.1.2.2.1 - Situações que ocorreram nos 10 cenários sísmicos estudados	125
6.2.1 - Estatísticas no número de ocorrências de qualquer magnitude durante períodos de 7, 15 e 30 dias para as regiões de Lisboa e Andaluzia	130
6.2.2 - Sistema de pontuação utilizado para a calibração da variável <i>centro</i> , para o precursor Sismicidade Local	134
6.1.1.1 - Número de ocorrências de qualquer magnitude verificadas no período de tempo T0 que precedeu as 12 ocorrências estudadas	136
6.2.1.2 - Grau de alarme associado à Sismicidade Local e pontuação de resultados, para a região da Andaluzia	137
6.2.1.3 - Total da pontuação obtida para cada valor de <i>centro</i>	138
6.2.2.1 - Grau de alarme associado à Sismicidade Local, para a região de Lisboa e da Andaluzia	140
7.2.1 - Representação das situações possíveis associadas ao precursor Condições Iniciais	143
7.2.1.1 - Medidas de desempenho para o precursor Condições Iniciais, na região de Lisboa	147
7.2.1.2 - Medidas de desempenho para o precursor Condições Iniciais, na região da Andaluzia	147
7.3.1 - Representação das situações possíveis associadas ao precursor Sismicidade Local	154

7.3.1.1 - Medidas de desempenho do precursor Sismicidade Local, para a região de Lisboa	155
7.3.1.2 - Medidas de desempenho do precursor Sismicidade Local, para a região da Andaluzia	155
8.2.1.1 - Situações sísmicas reais experimentadas para a região de Lisboa	172
8.2.1.1 - Situações sísmicas reais experimentadas para a região da Andaluzia	172
8.2.1.3 - Grau de alarme e medidas de desempenho dos precursores, para as situações sísmicas reais estudadas na região de Lisboa	172
8.2.1.4 - Grau de alarme e medidas de desempenho dos precursores, para as situações sísmicas reais estudadas na região da Andaluzia	173
8.2.1.5 - Grau de Alarme Total para as situações reais estudadas na região de Lisboa	175
8.2.1.6 - Grau de Alarme Total para as situações reais estudadas na região da Andaluzia	175
8.2.2.1.1 - Síntese de resultados obtidos na Análise de Sensibilidade efectuada	179

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução

Os sismos são, provavelmente, a mais temível catástrofe natural. A previsão dos abalos sísmicos tem preocupando o homem desde longa data. Já o homem das cavernas, quando sentia um tremor de terra pensava, por vezes, que os deuses estavam zangados.

Actualmente, mesmo o cidadão de pouca instrução já ouviu falar em “tremor de terra”, e sabe se vive numa zona onde é, ou não, frequente, a sua ocorrência .

Desenvolveram-se já várias técnicas de previsão sísmica, em diversas partes do globo, que nalguns casos apresentaram resultados promissores.

A importância da *previsão sísmica* e a avaliação do *risco sísmico*, desempenham hoje um papel fundamental nos países civilizados.

A **Investigação Operacional**, dada a sua natureza interdisciplinar e sistémica, constitui um precioso contributo para a modelação do processo de ocorrências sísmicas, previsão sísmica e avaliação do risco sísmico. Para tal, é importante o recurso à Estatística, à Teoria da Decisão, aos Métodos de Optimização e à Simulação. De referir ainda que, os constantes progressos nos equipamentos informáticos tornaram possível a monitorização e elaboração de catálogos sísmicos, indispensáveis para a implementação de um Sistema de Alarme Sísmico.



A área abrangida por esta Dissertação limita-se à Península Ibérica que, do ponto de vista tectónico, deve ser integrado na região Ibero-Magrebina (Portugal, Espanha, Marrocos, Argélia e Tunísia).

O catálogo editado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Sousa, Martins e Oliveira, 1992), serviu de base para as análises levadas a cabo nesta Dissertação, como se referirá detalhadamente, em na secção 2.2.

Com base na informação disponível procedeu-se à modelação de um *Sistema de Alarme Sísmico* para a Península Ibérica, que, em função da situação sísmica dada permite determinar o *Grau de Alarme Sísmico*, para uma dada região, durante um determinado horizonte temporal.

Um Sistema de Alarme Sísmico deverá, face a uma situação sísmica dada, relativa a uma região, conduzir à classificação da situação como de *alarme*, de *vigilância* ou *normal*, num determinado horizonte temporal.

Idealmente, um Sistema de Alarme Sísmico deveria “accionar o alarme” **apenas** quando estivesse iminente a ocorrência de um sismo de forte magnitude, na zona e horizonte temporal em estudo. Assim, as percentagens de *sismos previstos*, *falsos alarmes* e *tempo de alarme*, serão importantes medidas de desempenho do Sistema de Alarme Sísmico. Com efeito, e por redução ao absurdo, se um Sistema de Alarme conduzisse a uma *situação de alarme* em permanência, detectaria, obviamente todos os sismos, embora tal situação fosse completamente intolerável na realidade.

Para se conceber um Sistema de Alarme Sísmico para a Península Ibérica é importante dispor-se de um modelo do Processo Estocástico de Ocorrências Sísmicas na Península Ibérica (PESPI), que permitirá simular esse processo de ocorrências. Costa (Costa, 1989) propôs um modelo tridimensional (Tempo-Grandeza-Espaço) que foi calibrado com o catálogo de dados mais recente (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) e que permite simular o Processo de Ocorrências Sísmicas na Península Ibérica a partir de condições iniciais.

A concepção de um Sistema de Alarme Sísmico está associada à caracterização de *precursores sísmicos* (i.e., de fenómenos que permitam antever, com elevada probabilidade, a ocorrência de sismos de forte magnitude, em determinada zona e horizonte temporal). A título de exemplo, refira-se os seguintes precursores sísmicos: situação sísmica recente, variações das quantidades de Radão dissolvido na água dos poços profundos; variações na relação v_P/v_S ; variações da resistividade eléctrica da crosta terrestre, etc.

Na figura 1.1.1 seguinte, esquematiza-se um Sistema de Alarme Sísmico.

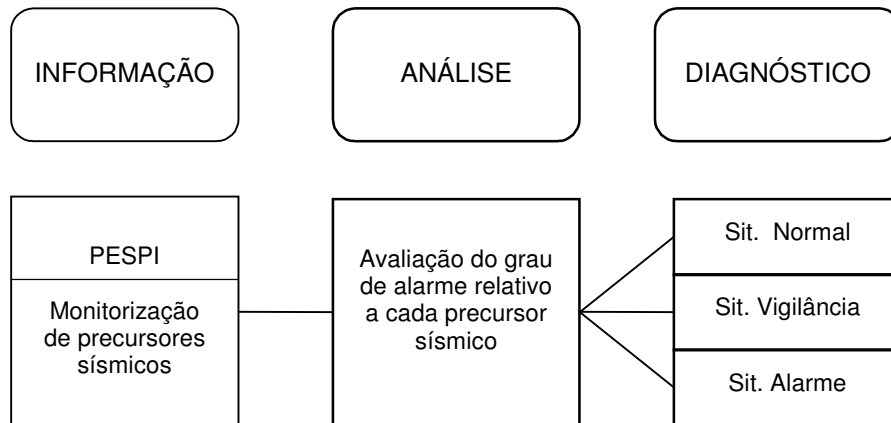


Figura 1.1.1 - Representação de um Sistema de Alarme Sísmico

A informação disponível actualmente, relativamente à Península Ibérica, permitiu considerar dois precursores sísmicos: a *sismicidade local* e as *condições iniciais* (do modelo proposto por Costa (Costa 1989)).

O Sistema de Alarme Sísmico proposto avalia o “grau de preocupação” relativo a cada precursor utilizado (com base na Teoria dos conjuntos Vagos), sendo estes “combinados” de acordo com a sua importância (através da metodologia AHP). Finalmente, é feito um “diagnóstico” que utiliza três classificações: “situação normal”, “situação de vigilância” e “situação de alarme”.

1.2 - Sistemas de Alarme Sísmico - Uma Panorâmica

O problema da previsão sísmica, e consequente possibilidade de instalação de um Sistema de Alarme Sísmico, tem sido uma das preocupações não só dos sismólogos, mas também da sociedade civil em geral.

Actualmente, a maior parte da investigação nesta área é feita nos EUA, Rússia, Japão, China e Itália. Nesta secção pretende-se apresentar um breve “estado da arte” desta área do conhecimento.

Talvez a previsão sísmica, mais bem sucedida da história, tenha sido a do sismo de 4 de Fevereiro de 1975, na cidade Chinesa de Haicheng, que atingiu a magnitude de 7.3 na escala de Richter, e foi previsto apenas com uma margem de erro de algumas horas.

Porém, a investigação neste campo está ainda no início, e a prova disso foi a ocorrência de um abalo não previsto, de magnitude 7.8, na vizinha cidade de Haicheng, Tangshan, 18 meses mais tarde, que provocou 600 mil mortos e 850 mil feridos.

Mas o campo da previsão sísmica também tem sido fértil para aproveitamentos menos dignos, de toda a espécie de pseudo-cientistas.

Um aspecto também interessante da previsão sísmica é o da repercussão na opinião pública da divulgação de previsões de sismos de forte magnitude. Com efeito, alguns autores (Press, 1980) referem os efeitos negativos da divulgação de previsões. No entanto, o efeito depende do grau de preparação da população, à semelhança aliás, do que acontece com outras catástrofes naturais, tais como inundações, tempestades, e tornados.

Existem estudos sobre os efeitos sociais de avisos à população. Por exemplo, Rikitake (Rikitake, (1976)) cita dois casos paradigmáticos: quando entre 1965 e 1967 se fizeram sentir inúmeros abalos sísmicos na área de Matsushiro, Japão, foram emitidos vários avisos à população, prevendo-se ocorrências potencialmente destruidoras, com uma margem de erro de cerca de um mês. Estes avisos foram na sua maioria ignorados. O mesmo autor cita ainda os avisos feitos em 1974, pelo U.S.G.S. alertando para a possibilidade da ocorrência de um sismo de forte magnitude, na localidade de Hollistree, Califórnia. Como esse sismo não ocorreu, os organismos oficiais Norte Americanos têm evitado divulgar previsões.

Em populações costeiras, a divulgação de previsões de sismos de forte magnitude, especialmente de epicentro no mar, pode ter ainda o efeito de atrair “curiosos” para ver o possível tsunami. Como refere Gaskell (Gaskell, 1975), foi o que aconteceu na Califórnia, onde a população, na sequência de um aviso de maremoto, em vez de fugir para terra firme, preferiu deslocar-se até à praia, entusiasmada pela possibilidade de observação deste fenómeno raro. Por sorte, a vaga era muito menor do que se esperava.

Dois grandes métodos que têm sido seguidos para abordar o problema da previsão sísmica:

- Métodos Físicos
- e
- Métodos Numéricos.

Nas secções 1.2.1 e 1.2.2 apresenta-se um breve resumo destes métodos.

1.2.1 - Métodos Físicos de Previsão Sísmica

Nesta secção descreve-se os principais precursores sísmicos conhecidos, de natureza Física. Embora actualmente, na Península Ibérica, não exista informação suficiente sobre eles, espera-se que o avanço da tecnologia permita identificá-los e integrá-los em Sistemas de Alarme Sísmico.

1.2.1.1 - Variações das quantidades de Radão dissolvido na água dos poços profundos

Sadovsky et al. (1972) verificaram que no Tsahkent, Rússia, imediatamente antes de um abalo sísmico se deu um aumento da emissão de radiação de Radão, seguida de uma queda logo após o sismo.

Também antes do sismo de 1975 da cidade chinesa de Haicheng, registou-se um aumento da concentração deste gás nos lençóis de águas subterrâneas (Schiller, 1984).

Verifica-se também, que existe uma correlação negativa entre a velocidade do aumento das emissões de radiação e a magnitude do próximo sismo. Quer isto dizer que, a um aumento progressivo da radiação emitida (da ordem de vários anos), segue-se um sismo de forte magnitude, e a um acentuado aumento da radiação emitida, (da ordem de vários meses), segue-se um sismo de fraca magnitude. No entanto, ainda não se encontrou uma relação quantitativa entre a taxa de aumento das emissões de Radão e as magnitudes sísmicas registadas.

Porém, este precursor apresenta a desvantagem do processo utilizado na sua medição ser indirecto, pois consiste em extrapolar os teores de R_n , da ordem de algumas partes por milhão, a partir da emissão alfa medida em amostras de água de poços profundos.

1.2.1.2 - Variações na relação v_P/v_S

O Instituto de Física da Terra, em Moscovo, verificou existir variação na relação entre as velocidades das ondas compressivas, longitudinais ou *primárias* (v_P) e a das ondas de cisalhamento, transversais ou *secundárias* (v_S) *versus* intervalos de acalmia (veja-se Sadovsky et al. (1972)).

Verificou-se ainda que, a duração do período em que o abaixamento dos valores de v_P/v_S era sensível, era proporcional à magnitude do sismo seguinte.

Provavelmente, este efeito está relacionado com a variação das propriedades físicas das rochas fracturadas (nomeadamente, a sua condutibilidade para as ondas sísmicas), à medida que aumenta a grandeza do regime de tensões que precede um sismo.

As variações na relação v_P/v_S não são sempre observadas antes de um sismo, no entanto, foram já registadas várias vezes na Rússia, EUA e China.

1.2.1.3 - Variações da resistividade eléctrica da crosta terrestre

Estudos também elaborados pelo Instituto de Física da Terra de Moscovo, efectuados no Tadjiquistão, revelaram variações da resistividade eléctrica da crosta, que segundo Sadovsky, se podem considerar premonitórias de abalos sísmicos (veja-se (Sadovsky et al. (1972))).

Também segundo Schiller (Schiller, 1984) a resistividade eléctrica em volta da cidade de Haicheng variava de dia para dia, antes do sismo de 4 de fevereiro de 1975.

As observações deste tipo de variação são feitas enterrando eléctrodos de ambos os lados de uma falha activa, fazendo passar entre eles uma corrente eléctrica de intensidade conhecida, e registando as variações nas diferenças do potencial eléctrico.

1.2.1.4 - Técnicas Geodésicas

Verifica-se que, em zonas de acumulações de tensões tectónicas há uma variação angular na posição espacial das rochas que, embora da ordem dos microrradianos é mensurável.

Foi identificada uma correlação entre o valor da inclinação crustal ou a sua direcção, e a ocorrência de sismos. Este fenómeno foi registado no Japão (Kanamori, 1972), nos EUA (Press, 1980) e em Haicheng (Schiller, 1984). Schiller refere que durante as semanas que precederam o sismo de Haicheng, os instrumentos do observatório de Shenyang registaram uma alteração surpreendente da inclinação do terreno, de Noroeste para Sudoeste.

Observações feitas entre Julho de 1973 e Março de 1974 (Johnston e Mortensen, 1974) em Nutting, Califórnia, sobre a falha de Santo André, mostram claramente que cada grande abalo é precedido por uma mudança na direcção da inclinação crustal.

1.2.1.5 - Modelo de difusão por dilatação

Este modelo surgiu da necessidade de explicar o conjunto de alterações Físicas que conduzem aos fenómenos sísmicos.

O modelo resulta de experiências laboratoriais (Press, 1980), e apresenta a seguinte sequência de processos:

- **Aumento da deformação elástica da crosta.**

- **Abertura de micro-fissuras.** Este fenómeno provoca:

- diminuição da relação v_P/v_S ;
- aumento da resistividade eléctrica se a rocha estiver seca, ou a sua diminuição se a mesma contiver fluidos;
- aumento do fluxo de água, no caso desta estar disponível, tendo como consequência, a migração do Radão contido na rocha para a água;
- aumento do volume da rocha fissurada (dilatância);
- diminuição do número de microsismos, dado que o aumento do número de fissuras faz com que estas se tornem progressivamente sub-saturadas em água, o que provoca um aumento do atrito e, consequentemente, inibição do falhamento.

- **Difusão da água para a zona dilatante.** As consequências são:

- aumento da relação v_P/v_S ;
- aumento da pressão nos poros;
- diminuição da resistividade eléctrica;
- diminuição do atrito;
- aumento do número de microsismos.

- **Ocorrência sísmica.**

- **Diminuição da tensão e recuperação de algumas das propriedades originais da rocha.**

1.2.1.6 - Outros Métodos Físicos

Variações do campo geomagnético podem também ser consideradas precursores sísmicos. Oshiman (Oshiman et al., 1991) observaram variações no campo geomagnético, numa zona de falha do Norte da Anatólia.

Segundo Lambert (Lambert et al., 1991), antes de um abalo sísmico, o campo gravítico sofre alterações (depois de filtrado o ruído de fundo e das componentes conhecidas do campo local, causadas pelas diferentes densidades dos corpos líticos subjacentes). Também na região de Haicheng os valores da gravidade terrestre baixaram espectacularmente, alguns dias antes do sismo de 1975.

Kumpel (Kumpel, 1992) considera a variação da pressão nos poros das rochas como precursora de fenómenos sísmicos. Este fenómeno, está provavelmente relacionado, com as variações de resistividade eléctrica e teores de Radão dissolvidos na água dos poços profundos.

Utilizando dados históricos Italianos desde 1873, Albarello (Albarello et al., 1991) fizeram uma avaliação indirecta da pressão nos poros das rochas, através do estudo das variações do nível da água dos poços (depois de filtrado o contributo das águas pluviais). Estes autores afirmam serem aquelas variações precursores sísmicos.

Existem ainda outros fenómenos premonitórios, que só raramente acontecem antes de sismos de forte magnitude. Por exemplo, antes do grande sismo de 4 de Fevereiro de 1975, na cidade de Haicheng, as nascentes límpidas à volta da cidade tornaram-se lamacentas, o fluxo de petróleo dos poços aumentou consideravelmente, empurrado para cima pela crescente pressão na rocha.



Seria útil referir ainda a controversa questão do comportamento anormal dos animais antes de um tremor de terra. Apesar de todas as especulações sobre esta matéria, o que é certo é que, os animais são, muitas vezes, capazes de sentir vibrações, ouvir sons, cheirar gases, e pressentir alterações eléctricas que os homens não conseguem detectar.

A este respeito Schiller (Schiller, 1984) refere que antes do sismo de Haicheng: "foram registados 700 casos insólitos de comportamento animal. Porcos e vacas pularam para fora dos cercados; cobras rastejaram dos covis e morreram geladas na neve; viram-se aves voando à volta dos aviários, segurando os ovos nas patas; ratos corriam de um lado para o outro, carregando filhotes na boca".

Outros autores, tais como Matteucig (Matteucig, 1983) têm desenvolvido trabalhos nesta área.

1.2.2 - Métodos Numéricos de Previsão Sísmica

Visto que se optou por utilizar o modelo de inspiração Markoviana proposto por Costa (Costa, 1989), para efectuar a simulação do PESPI, e que se descreverá em pormenor em 2.1.2, não se achou necessário fazer grande referência a outros modelos numéricos de previsão sísmica.

Refira-se apenas que os modelos clássicos Poissonianos são caracterizados, entre outros aspectos, por “não possuírem memória”. Ora este facto, contradiz o objectivo de se pretender monitorizar o Sistema de Alarme Sísmico com base na incorporação de dados recentes.

Têm sido desenvolvido *Sistemas Multiprecursores*, com vista à sua utilização em Sistemas de Alarme Sísmico ((Aki, 1981), (Grandori et al., 1988), (Guagenti-Grandori et al., 1980)).

Segundo estudos feitos por Grandori, Guagenti e Perotti (Grandori et al., 1988), nalgumas regiões de Itália, os sismos com magnitudes compreendidas entre certos limites de intensidade podem constituir valiosos precursores sísmicos.

Segundo Martins e Mendes Victor (Martins e Mendes Victor, 1994), a escola Russa de Keilis-Borok desenvolveu um método que se baseia nas seguintes características:

- Níveis de actividade sísmica;
- Variação temporal da sismicidade;
- Concentração temporal dos sismos;
- Concentração espacial dos sismos.

Com base nestas características, e na definição de um conjunto de intervalos para magnitudes, define-se um conjunto de 10 parâmetros, variáveis e funções, que têm como componentes essenciais o número de sismos ocorridos com aquelas magnitudes, em janelas temporais móveis.

Refira-se por último a utilização de Redes Neurais ao problema da previsão sísmica (veja-se Alves, 1995).

1.3 - Estrutura da Dissertação

Esta Dissertação encontra-se dividida em nove capítulos, cujo conteúdo se passa a apresentar resumidamente.

Capítulo 1 - Introdução

Apresenta-se o tema a abordar, e uma descrição sucinta do Sistema de Alarme Sísmico proposto. Efectua-se também, uma panorâmica dos *precursores sísmicos* actualmente conhecidos, mesmo aqueles para os quais não existam registos suficientes que os permitam incorporar no Sistema de Alarme Sísmico, para a Península Ibérica, que se desenvolverá.

Capítulo 2 - Metodologia

São abordados os principais métodos utilizados, importantes para a compreensão dos temas a apresentar nos capítulos seguintes. Dá-se especial importância à descrição do modelo adoptado para a modelação e simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica (veja-se 2.1.2).

Com vista a facilitar a leitura dos capítulos seguintes, descreve-se também, embora de forma sumária, o processo de geração de números pseudo-aleatórios utilizado (2.1.1), e os aspectos fundamentais da Metodologia AHP (Analytic Hierarchy Process) (2.1.3) e da Teoria dos Conjuntos Vagos (2.1.4).

Considerou-se importante incluir também neste capítulo uma referência aos dados disponíveis para a elaboração desta Dissertação (2.2).

Capítulo 3 - Análise do precursor Condições Iniciais

Este precursor é constituído pelas Condições Iniciais do modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas adoptado.

É feita uma análise deste precursor, sem contudo se apresentar a metodologia proposta para a determinação do grau de alarme que lhe está associado.

O estudo deste precursor é efectuado primeiramente para comparar “cenários sísmicos reais”, e numa fase posterior, mais geral, para comparar a influência dos factores Tempo, Grandeza e Espaço no processo de ocorrências sísmicas da Península Ibérica.

Capítulo 4 - Análise do precursor Sismicidade Local

Este precursor refere-se ao número de ocorrências de qualquer magnitude, registadas numa região, durante um horizonte temporal.

Tal como para o precursor Condições Iniciais, efectua-se o estudo deste precursor, sem contudo se apresentar a metodologia proposta para a determinação do grau de alarme que lhe está associado.

Capítulo 5 - Grau de alarme do precursor Condições Iniciais

Apresenta-se um Sistema de Controlo Vago, que permite, para cada par região/horizonte temporal, determinar o grau de alarme do precursor Condições Iniciais.

A calibração do Sistema envolvido foi efectuado com base em “condições iniciais reais”, ou seja, em situações que efectivamente ocorreram no processo de ocorrências sísmicas.

Capítulo 6 - Grau de alarme do precursor Sismicidade Local

Apresenta-se um Sistema de Controlo Vago, que permite, para cada par região/horizonte temporal, determinar o do grau de alarme do precursor Sismicidade Local.

A calibração do Sistema envolvido foi efectuado com base em “valores reais de sismicidade local”, ou seja, em valores de sismicidade local que efectivamente ocorreram no processo de ocorrências sísmicas.

Capítulo 7 - Medidas de desempenho dos precursores sísmicos

Neste capítulo avaliam-se os precursores sísmicos com base nas medidas de desempenho: *percentagem de sismos previstos*, *percentagem de falsos alarmes* e *percentagem de tempo de alarme*. Obviamente, a avaliação dos precursores reveste-se de especial interesse, na “importância” que o grau de alarme de cada um deles deve ter no grau de alarme final.

Capítulo 8 - Grau de Alarme Sísmico

Com base nos diversos valores de grau de alarme de cada precursor utilizado, e nas correspondentes medidas de desempenho, é finalmente determinado o Grau de Alarme Sísmico Total.

Capítulo 9 - Conclusões e Desenvolvimentos

Neste capítulo são referidas as limitações, potencialidades e possíveis desenvolvimentos desta Dissertação.

Anexo A

Apresentam-se os resultados das Análises de Sensibilidade levadas a cabo para as situações sísmicas estudadas.

Referências Bibliográficas

Capítulo 2

METODOLOGIA

Este capítulo ocupa-se da apresentação dos principais métodos utilizados nesta Dissertação.

Reveste-se de especial importância, para a compreensão dos capítulos seguintes, a apresentação do Modelo de geração do processo de ocorrências sísmicas utilizado (veja-se 2.1.2).

2.1 - Métodos utilizados

2.1.1 - Geração de valores pseudo-aleatórios

Utilizou-se o *método congruencial misto para a geração de números pseudo-aleatórios* uniformemente distribuídos.

Os métodos congruenciais foram inicialmente descritos por Lehmer, em 1951 e são considerados os melhores de entre os métodos conhecidos para gerar sequências pseudo-aleatórias.

Um método congruencial para a geração de números pseudo-aleatórios tem a seguinte forma geral:

$$x_{i+1} = (a \cdot x_i + c) \bmod m, \quad i = 0, 1, \dots, n$$

em que $(ax_i + c) \bmod m$ significa resto da divisão de $(ax_i + c)$ por m . a , c e m são constantes, designando-se a por multiplicador e m por módulo

Dado um valor inicial x_0 , que se designa por *fonte de aleatoriedade, semente* ou *seed number*, é gerada uma sequência de valores pseudo aleatórios x_i .

Quando $x_0 = x_n$ completa-se o **ciclo de geração** dos números pseudo-aleatórios, obtendo-se assim um **período completo**, ou seja, a partir daí a sequência começa a repetir-se.

Nos métodos congruenciais nenhum valor da sequência excede m , e o período- p é igual a $m-1$.

Prova-se (Knuth, 1971, pp.15-18) que, se as três condições seguintes se verificarem, se obtém uma sequência de período completo, ou seja sem repetições:

- 1) c e m são primos entre si;
- 2) $a = b + 1$, em que b é um múltiplo de p ;
- 3) b é múltiplo de 4.

Se estas condições se verificarem, a escolha da semente é irrelevante.

Em computadores binários é usual escolher-se para valor de m uma potência de 2. Normalmente $m = 2^w$, em que w é o número de bits disponíveis para representar números inteiros. Então a condição 3 inclui a condição 2.

Como se utilizou um computador de 16 bits, $m = 2^{16} = 65536$, b deve ser múltiplo de 4, escolheu-se $b = 25172$, donde $a = b + 1 = 25173$ e por último $c = 13849$ e m são primos entre si.

Segundo Pidd (Pidd, 1984), com esta escolha, obtém-se uma sequência de valores inteiros uniformemente distribuídos no intervalo $[0, 65536[$ com um ciclo formado por 65536 valores distintos. Para se obter valores no intervalo $[0, 1[$ basta dividir o valor gerado por 65536.

Nas aplicações desenvolvidas teve-se o cuidado de alterar a 'semente', sempre que se completava o ciclo de geração.

2.1.2 - Geração do processo de ocorrências sísmicas

O modelo adoptado para a simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica foi proposto por Costa (Costa, 1989) e destaca-se dos tradicionais modelos Poissonianos, por possuir “memória”. Com efeito, neste modelo, cada ocorrência depende das duas ocorrências que a precederam.

O referido modelo utilizado foi construído com base no catálogo de sismos para a Zona Ibérica: “Sismicidad del Area Ibero Mogrebi”, J. Mezcua, J. Martinez Solares (Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 1983), tendo-se considerado apenas os registos correspondentes a todas as ocorrências sísmicas posteriores a 1900, já que os registos anteriores nem sempre apresentavam informação suficiente.

Por se dispor de uma compilação de catálogos sísmicos mais recente, decidiu-se calibrar o modelo de geração do processo de ocorrências sísmicas proposto por Costa (Costa, 1989) a partir dos dados constantes do catálogo (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) continuando-se, no entanto, a não considerar os registos correspondentes a ocorrências anteriores a 1900. Na secção 2.2 refere-se os dados utilizados.

No modelo adoptado, cada ocorrência é caracterizada por três factores: **Tempo**, **Grandeza** e **Espaço**.

O factor **Tempo** é caracterizado pelos valores dos intervalos de tempo entre sismos consecutivos - **Dt**; a **Grandeza** - **G** é caracterizada pelos valores de magnitude Richter associados às ocorrências; o **Espaço** - **E** é caracterizado pelo número da **zona sísmica** correspondente ao epicentro da ocorrência. Para o factor espaço, adoptou-se a definição de 21 **zonas sísmicas** na Península Ibérica proposta por Costa e Oliveira (Costa, 1989), (Costa e Oliveira, 1991), que abrangem a região delimitada por Longitude 15° W - 4° E , Latitude 34,5° N - 44° N.

Estas zonas foram reajustadas (de forma a suavizar os seus contornos, relativamente às *zonas sísmicas* propostas por Costa (Costa, 1989)), conforme se pode ver na figura 2.1.2.1.

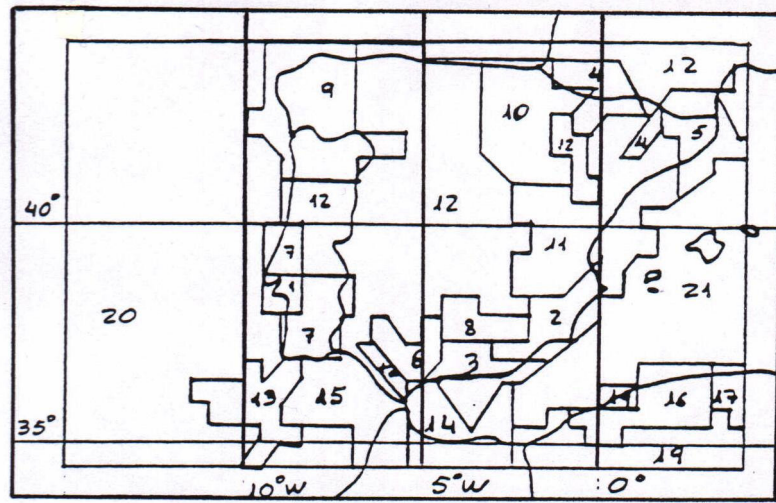


Figura 2.1.2.1 - Zonas sísmicas da Península Ibérica

De referir ainda que o novo catálogo sísmico utilizado na calibração do modelo (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) , abrange uma área ligeiramente inferior à do catálogo utilizado aquando da definição das 21 *zonas sísmicas* atrás referidas, o que resulta na eliminação da *zona sísmica* número 18. Embora o número das *zonas sísmicas* passe então a 20, decidiu-se manter a numeração das *zonas sísmicas* anteriormente definida por Costa e Oliveira (Costa, 1989), (Costa e Oliveira, 1991), pelo que, as *zonas sísmicas* utilizadas neste trabalho serão referenciadas de 1 a 17 e de 19 a 21.

O modelo de geração do processo de ocorrências sísmicas utilizado admite que:

- o intervalo de tempo entre duas ocorrências sísmicas (Dt_i) é dependente dos dois intervalos precedentes (Dt_{i-1} , Dt_{i-2}), i. e.,

$$(Dt_{i-2}, Dt_{i-1}) \rightarrow Dt_i$$

- a grandeza (magnitude) de uma ocorrência sísmica (G_i) é dependente dos valores das grandezas dos dois sismos precedentes (G_{i-1} , G_{i-2}), bem como do valor do intervalo de tempo entre essa ocorrência e a precedente (Dt_i), i. e.,

$$(Dt_i, G_{i-2}, G_{i-1}) \rightarrow G_i$$

- a localização (Espaço) de uma ocorrência sísmica (E_i) é dependente do respectivo valor precedente (E_{i-1}) bem como da grandeza da ocorrência (G_i) e do intervalo de tempo entre essa ocorrência e a precedente (Dt_i) i. e.,

$$(Dt_i, G_i, E_{i-1}) \rightarrow E_i$$

Assim, para se iniciar a geração do processo de ocorrências sísmicas é necessário caracterizar as **condições iniciais**, (**cenário sísmico recente**) ou seja, atribuir valores a

$$Dt_{i-2}, Dt_{i-1}, G_{i-2}, G_{i-1} \text{ e } E_{i-1}.$$

Como se referiu, para se gerar o valor Dt_i é necessário conhecer os valores de Dt_{i-2} e Dt_{i-1} . Com base nestes dois últimos valores é seleccionada uma de entre 20 distribuições condicionadas de Dt_i por Dt_{i-2} e Dt_{i-1} , segundo o modelo adoptado (veja-se Costa, 1989, pag. 52 a 62).

A geração da Grandeza G_i é feita com base nos valores de Dt_i , G_{i-2} e G_{i-1} , valores estes que condicionam a selecção de uma das 10 distribuições condicionadas de G_i por Dt_i , G_{i-2} e G_{i-1} (veja-se Costa, 1989, pag.113 a 118).

Por último, a geração do número da *zona sísmica* E_i é feita a partir dos valores de Dt_i , G_i e E_{i-1} . Estes valores vão determinar a escolha de uma de entre 54 distribuições condicionadas de E_i por Dt_i , G_i e E_{i-1} (adaptado de Costa, 1989, pag. 162 a 175).

Uma vez seleccionadas as distribuições empíricas a utilizar há que gerar os valores dos factores Tempo, Grandeza e Espaço. Para este efeito utiliza-se o *método da inversão*.

Para a implementação informática da simulação do processo de ocorrências sísmicas, gerada de acordo com o que se acabou de descrever, utilizou-se a linguagem de programação PASCAL. A maior parte dos resultados foram obtidos num PC DX4.

Na figura 2.1.2.2 seguinte, esquematiza-se a geração do Processo de Ocorrências Sísmicas na Península Ibérica.

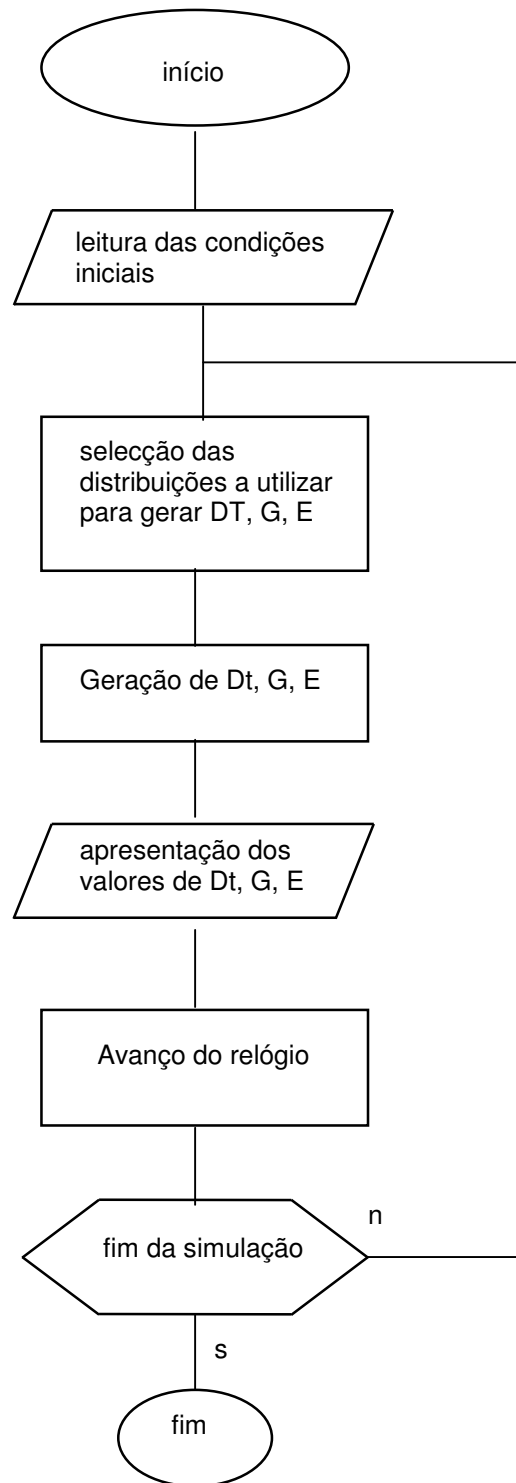


Figura 2.1.2.2 - Fluxograma representativo da simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica

A determinação do número médio de ocorrências de magnitude superior ou igual a um valor pré-fixado G_0 , numa região, durante um horizonte temporal T_0 é feita com recurso à simulação. É natural que se espere um aumento da precisão dos resultados com o aumento do número de simulações efectuadas.

Dado que, como adiante se verá, nesta Dissertação se efectuam experiências para as regiões de Lisboa e da Andaluzia, simulou-se o processo de ocorrências sísmicas, para estas duas regiões, para horizontes temporais de 7 e 15 dias.

Determinou-se o intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4.0, bem como o coeficiente de variação (desvio padrão/valor médio), utilizando-se 1000, 5000, 10000 e 15000 simulações do processo de ocorrências sísmicas.

Dado que as condições iniciais podem influir de forma significativa no processo de ocorrências sísmicas, utilizaram-se valores de $D_{t_{i-1}}$ e $D_{t_{i-2}}$ próximos do valor médio da distribuição empírica de D_t , valores de G_{i-1} e G_{i-2} próximos do valor médio da distribuição empírica de G e E_{i-1} foi afectado com o número de uma *zona sísmica* com sismicidade moderada, pretendendo-se assim obter resultados para um “cenário sísmico médio”.

As figuras 2.1.2.3 a 2.1.2.5 e 2.1.2.6 a 2.1.2.8 apresentam os resultados obtidos, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia, respectivamente.

Como seria de esperar, verifica-se uma notória diminuição da amplitude dos intervalos de confiança para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, quando o número de simulações efectuado passa de 1000 para 5000, sendo a diminuição menos notória quando aquele número aumenta para 10000, e muito pouco notória quando o número de simulações sobe para 15000. Assim, parece aceitável que, para análises posteriores, sejam consideradas 10000 simulações.

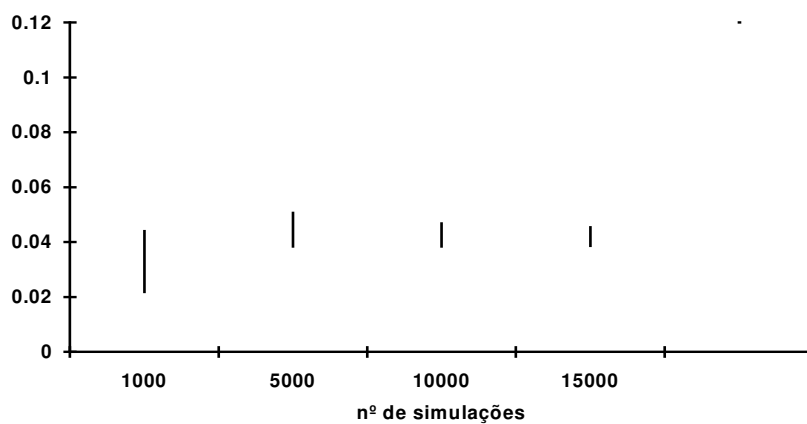


Figura 2.1.2.3 - Amplitude do intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, para um período de tempo de 7 dias, em função do número de simulações

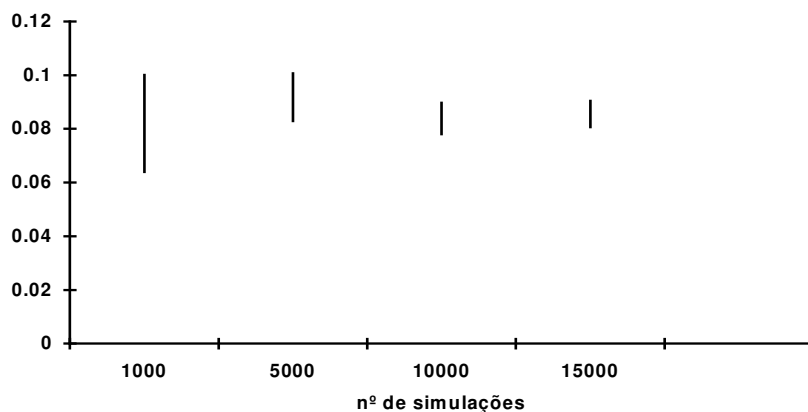


Figura 2.1.2.4 - Amplitude do intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, para um período de tempo de 15 dias, em função do número de simulações

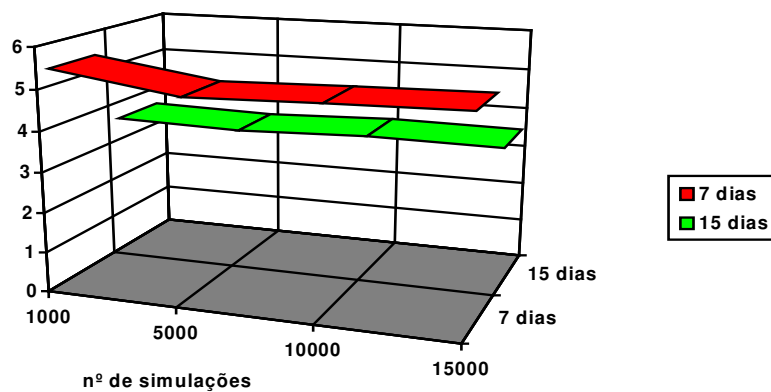


Figura 2.1.2.5 - Coeficiente de variação do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, para a região de Lisboa, em função do número de simulações

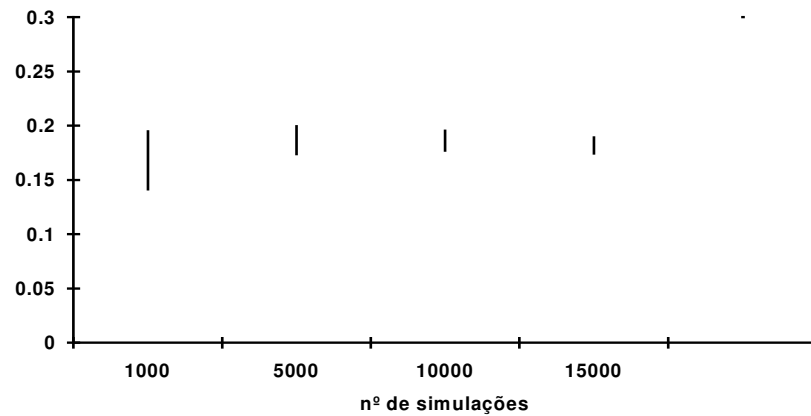


Figura 2.1.2.6 - Amplitude do intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região da Andaluzia, para um período de tempo de 7 dias, em função do número de simulações

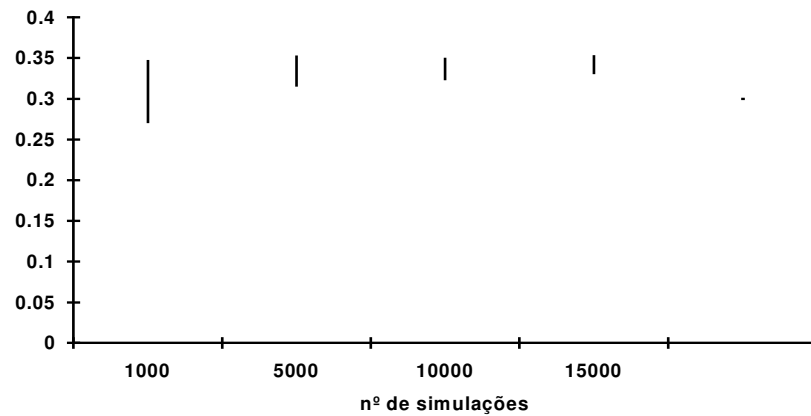


Figura 2.1.2.7 - Amplitude do intervalo de confiança a 95% para o valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região da Andaluzia, para um período de tempo de 15 dias, em função do número de simulações

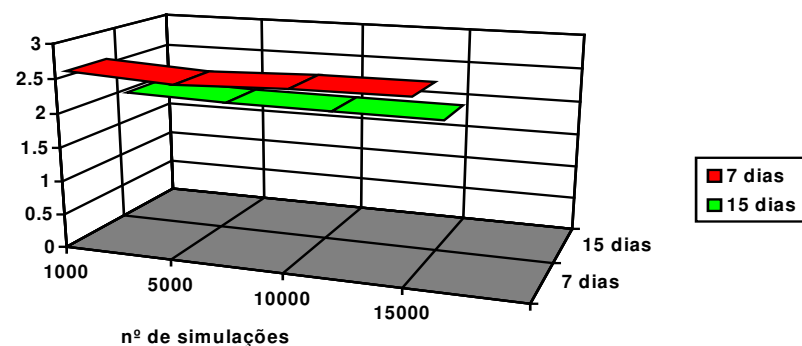


Figura 2.1.2.8 - Coeficiente de variação do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, para a região da Andaluzia, em função do número de simulações

Verifica-se assim que, a partir das 10000 simulações a diminuição da amplitude do intervalo de confiança, não é compensatória (quanto maior for o número de simulações, maior será o tempo de simulação despendido). De notar que estes resultados foram obtidos com condições iniciais correspondentes a um “cenário sísmico médio”, já que, é de todo impossível determinar o número de simulações a efectuar, para cada caso a estudar. Além disto, não faria sentido obter resultados com base em diferentes números de simulações.

De referir ainda o comportamento do coeficiente de variação, que apresenta valores quase constantes para a região da Andaluzia, e uma ligeira diminuição, na região de Lisboa, quando o número de simulações sobe de 1000 para 5000, mantendo-se quase constante a partir desse número.

2.1.3 - AHP - The Analytic Hierarchy Process

A metodologia AHP (Analytic Hierarchy Process) é basicamente um método de análise multicritério de apoio à decisão. Teve a sua origem em finais de 1971, quando Thomas L. Saaty desenvolvia um trabalho de planeamento para o Departamento de Defesa Americano.

O AHP assenta numa teoria que parece reflectir o método natural de funcionamento da mente humana. Ao deparar-se com uma situação complexa, em que os elementos de um sistema se encontram desagregados, agrega-os, em grupos, segundo propriedades comuns. Este processo pode ser repetido, agrupando elementos com propriedades comuns de identificação, gerando os elementos de um outro nível mais elevado, até se atingir o topo da hierarquia que, em geral, pode ser identificado com o objectivo do processo decisório.

O que se acabou de descrever é normalmente denominado de **hierarquia linear**, isto é, um sistema que assenta no pressuposto de que os elementos do sistema podem ser agrupados em conjuntos disjuntos, tais que os elementos de cada conjunto influenciem apenas os elementos de um outro conjunto, e possam ser influenciados pelos elementos de um único conjunto.

Os elementos de cada conjunto, habitualmente designado por **nível**, devem ser independentes.

Nesta metodologia multicritério, as possíveis acções a tomar são comparadas à luz de cada **critério** (ou **característica**), comparando-se finalmente os critérios utilizados.

Normalmente, é complicado comparar globalmente as várias características utilizadas num problema de decisão multicritério. O método que melhor se parece adaptar à intuição humana é o de comparar as características duas a duas. A metodologia AHP segue exactamente esta abordagem. Para cada nível, começando no mais elevado, efectuem-se comparações entre pares de critérios que constituem o nível imediatamente abaixo, registando-se os resultados na forma de uma matriz quadrada, **a matriz de julgamentos**.

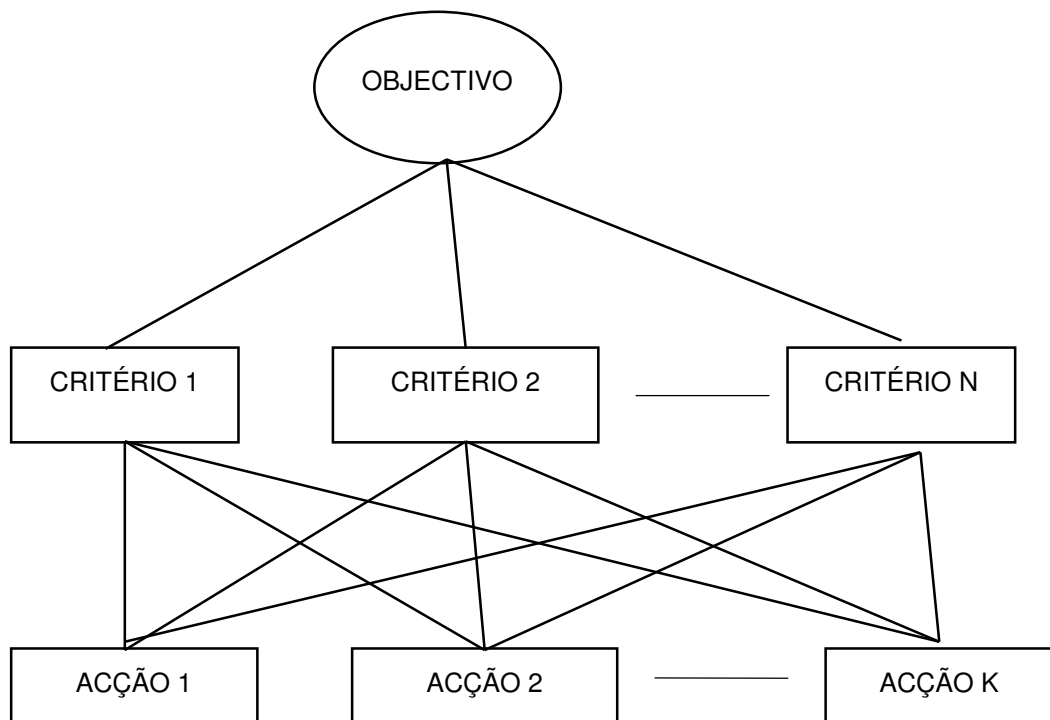


Figura 2.1.3.1 - Exemplo de hierarquia linear

Nesta matriz cada elemento tem o seguinte significado: se $a(i, j) = k$ então a característica correspondente à linha i é k “vezes mais importante” do que a característica correspondente à coluna j .

Qualquer *matriz de julgamentos* de dimensão n tem as seguintes propriedades:

- cada elemento $a_{ii} = 1$ ($i = 1, 2, \dots, n$);
- se $a_{ij} = \alpha$, então $a_{ji} = 1 / \alpha$, $\alpha \neq 0$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$).

Coloca-se agora a questão de encontrar uma escala para graduar “quantas vezes” uma característica é “mais importante” do que outra.

Thomas Saaty (Saaty, 1990) propôs uma escala de comparações de 1 a 9, com o seguinte significado:

Intensidade de importância	Definição
1	mesma importância
3	pequena importância de uma sobre a outra
5	importância grande de uma sobre a outra
7	importância muito grande de uma sobre a outra
9	importância absoluta de uma sobre a outra
2, 4, 6, 8	valores intermédios entre os valores adjacentes
nºs racionais	razões resultantes da escala

Quadro 2.1.3.1 - Escala de comparações utilizada na teoria AHP

O passo seguinte consiste na determinação do **vector de prioridades** associado a uma matriz de julgamentos.

Em termos matemáticos, o *vector de prioridades* é o vector próprio principal normalizado da *matriz de julgamentos*. Este vector indica a importância percentual de cada uma das características que foram comparadas na *matriz de julgamentos*.

Para estimar (já que o cálculo exacto é normalmente complicado) o vector de prioridades, Saaty (Saaty, 1990) propõe 4 algoritmos, dos quais se vai apresentar apenas o mais preciso.

Dada uma *matriz de julgamentos* M , quadrada de ordem n , multiplicam-se os n elementos de cada linha e toma-se a n -ésima raiz do produto, normalizando-se o vector resultante, ou seja:

$$t_1 = \prod_{j=1}^n m_{1j}, \quad \sqrt[n]{t_1} = s_1;$$

$$t_2 = \prod_{j=1}^n m_{2j}, \quad \sqrt[n]{t_2} = s_2;$$

.

.

.

$$t_n = \prod_{j=1}^n m_{nj}, \quad \sqrt[n]{t_n} = s_n.$$

Seja $T = \sum_{j=1}^n s_j$ e $p_1 = s_1/T$, $p_2 = s_2/T$..., $p_n = s_n/T$, então o vector

$\vec{p^A} = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$ é o *vector de prioridades* associado à matriz A .

Este vector representa a contribuição percentual de cada uma das possíveis acções a tomar, relativamente ao objectivo em análise.

2.1.4 - Teoria dos Conjuntos Vagos

Na lógica tradicional uma afirmação ou é verdadeira ou falsa. Na teoria clássica dos conjuntos um elemento tem forçosamente de pertencer ou não a um conjunto.

A regra do terceiro excluído é uma das regras mais importantes da Matemática, e durante muitos anos foi aceite como verdade inquestionável.

No entanto muitos são os conjuntos que não têm critérios de pertença precisamente definidos. Por exemplo, o conjunto das “pessoas novas”, das “pessoas felizes”, etc. Nestes conjuntos é difícil avaliar se uma pessoa lhes pertence ao não. Não podem ser encarados como conjuntos onde os elementos de um dado Universo lhes pertençam ou não. Devem antes ser vistos como conjuntos em que os elementos de um Universo lhes pertencem *com um certo grau*.

Este tipo de conjuntos foi originalmente introduzido por L. A. Zadeh em 1965, com o nome de “**Fuzzy Sets**” (**Conjuntos Vagos ou Difusos**), e não são mais do que uma tentativa de sistematizar mais precisamente conceitos que não obedecem à lógica bivalente de Aristóteles, isto é, conceitos onde os limites entre o “ter “ e o “não ter”, uma característica não são rígidos.

Embora os cientistas não lhe tenham dado muita importância no início, a Teoria dos Conjuntos Vagos passou a ser uma ferramenta muito útil em diversos domínios. Pode-se actualmente encontrar aplicações desta teoria na Inteligência Artificial, nas Ciências da Computação, na Teoria da Decisão, na Investigação Operacional e na Robótica.

Rabinowitz e Eck (Rabinowitz e Eck, 1988) propuseram a aplicação dos Conjuntos Vagos ao domínio da Sismologia, mais concretamente à definição de *falhas sísmicas*.

Invocar-se-á a Teoria Conjuntos Vagos para proceder atribuição do grau de alarme relativo a cada precursor sísmico utilizado.

Nas variáveis de entrada de um Sistema de Alarme Sísmico, nem sempre é fácil definir limites rígidos, a partir dos quais, elas indicam tratar-se de uma situação de alarme, sendo preferível associar-lhes um valor de grau de alarme, que indique tratar-se de uma situação de alarme com “um certo grau”.

2.2 - Dados disponíveis

A compilação de catálogos editada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) apresenta, para cada instante de ocorrência, informação relativa a:

- Data;

- Magnitude Richter;
- Intensidade;
- Latitude;
- Longitude e
- Profundidade.

O instante de ocorrência varia de 33 A. C. a 28 de Julho de 1991, e nem todos os registos possuem informação completa.

Dada a grande heterogeneidade dos dados ao longo do tempo, consideraram-se apenas os dados posteriores a 1900.

Como se pode ver no quadro 2.2.1, mesmo neste período de tempo, apenas 11.1% do total de registos, apresentam informação relativa a intensidade e magnitude.

nº total de ocorrências	11394
nº de ocorrências sem informação relativa a intensidade e magnitude	3915 (34.4%)
nº de ocorrências com informação relativa a intensidade e sem informação de magnitude	2211 (19.4%)
nº de ocorrências com informação relativa a intensidade e magnitude	1268 (11.1%)

Quadro 2.2.1 - Algumas características dos registos posteriores a 1900

Nos casos em que não se dispunha de informação relativa a Magnitude mas se conhecia o correspondente valor da Intensidade, utilizou-se a metodologia proposta por Costa e Oliveira (Costa, 1989), (Costa e Oliveira, 1991) para se gerar os valores de magnitude, a partir dos correspondentes valores de Intensidade.

De referir ainda que o modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas adoptado, utiliza informação das duas últimas ocorrências, e que os dados disponíveis nem sempre possuem essa informação. O quadro 2.2.2, apresenta esses valores, destacando as regiões de Lisboa (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 1 e 7) e a região da Andaluzia (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 2 e 3).

De referir ainda que, para cada registo, foi feita a conversão do instante de ocorrência do formato AA:MM:DD:hh:min:seg - AA- Ano, MM - Mês, DD - Dia, hh - hora, min - minuto, seg - segundo, para o formato decimal AA,d.

	Península Ibérica	Região de Lisboa	Região da Andaluzia
nº total de ocorrências	11394	810	2492
nº de ocorrências com informação de $D_{t_{i-2}}$ e $D_{t_{i-1}}$	11272	798	2472
nº de ocorrências com informação de $D_{t_{i-2}}$, $D_{t_{i-1}}$, G_{i-2} , G_{i-1} e E_{i-1}	5593	273	1417
nº de ocorrências de forte magnitude ($G \geq 5$) com informação de $D_{t_{i-2}}$, $D_{t_{i-1}}$, G_{i-2} , G_{i-1} e E_{i-1}	89	4	20

Quadro 2.2.2 - Número de registos, posteriores a 1900, com informação relativa às duas últimas ocorrências

Não foi possível encontrar, na Península Ibérica, dados referentes a outras grandezas, que eventualmente poderiam constituir precursores sísmicos, tais como:

- concentrações de Radão na água de poços profundos;
- resistividade eléctrica da crosta terrestre;
- variações na relação vP/vS *versus* intervalos de acalmia;
- variações do campo magnético terrestre;
- variações no nível da água dos poços e
- comportamentos anormais em animais.

O ideal seria possuir séries cronológicas multidisciplinares, ou seja, tanto séries cronológicas referentes a catálogos sísmicos (informação da data, magnitude e localização dos abalos sísmicos), como também series cronológicas de natureza geofísica, que possuíssem, por exemplo, as grandezas acabadas de referir, isto para já não falar noutro tipo de fenómenos premonitórios, que nem todos os autores reconhecem, tais como comportamentos anormais em animais.

Como actualmente não se dispõe de séries cronológicas de natureza geofísica, utilizou-se apenas a informação do catálogo sísmico acima referido (Sousa, Martins e Oliveira, 1992).

2.3 - Metodologia proposta para um Sistema de Alarme Sísmico

Pretende-se modelar um Sistema de Alarme Sísmico com base em dois precursores sísmicos (*condições iniciais e sismicidade local*). A inexistência de informação adequada, para a Península Ibérica, impede que sejam considerados outros precursores sísmicos (por exemplo, baseados em grandezas geofísicas ou em comportamentos anormais dos animais).

Em geral, nem todos os precursores indicam, simultaneamente, a proximidade de um abalo sísmico, no entanto, se o Sistema de Alarme for baseado na informação relativa ao maior número possível de precursores, então toda a informação disponível deve ser monitorizada e “combinada” de forma a obter-se o *grau de alarme sísmico total*.

Propõe-se então um Sistema de Alarme Sísmico em que, se determina primeiramente o *grau de alarme relativo a cada precursor*. Este deve ser tal que, quanto maior for o seu valor, maior a probabilidade de ocorrência de um sismo, numa região, para um dado horizonte temporal.

Admitiu-se que o grau de alarme relativo a cada precursor deveria variar entre 0 e 100. Os diversos valores de grau de alarme relativos a cada um dos precursores utilizados são depois combinados através de uma média pesada, com vista à determinação do **grau de alarme sísmico total**, ou, simplesmente **grau de alarme sísmico (GA)**, que deverá variar também entre 0 e 100.

A cada valor de grau de alarme sísmico pode associar-se classificações de situações sísmicas, como por exemplo, a seguinte:

$GA \in [0, 40]$ - ausência de alarme ou vigilância (situação normal);

$GA \in [30, 70]$ - vigilância;

$GA \in [60, 100]$ - alarme.

De notar que se, por exemplo, o grau de alarme for igual a 65, pode conceber-se uma situação “entre a vigilância e o alarme” (daí a importância do recurso à Teoria dos Conjuntos Vagos).

No calculo do grau de alarme os “pesos” intervenientes devem reflectir o “desempenho” de cada um dos precursores. De facto, de nada serve ter diversos valores de grau de alarme, relativos a diferentes precursores, se não se souber qual, ou quais, os precursores com maior probabilidade de prever um abalo sísmico.

A avaliação das medidas de desempenho dos precursores é feita no capítulo 7.

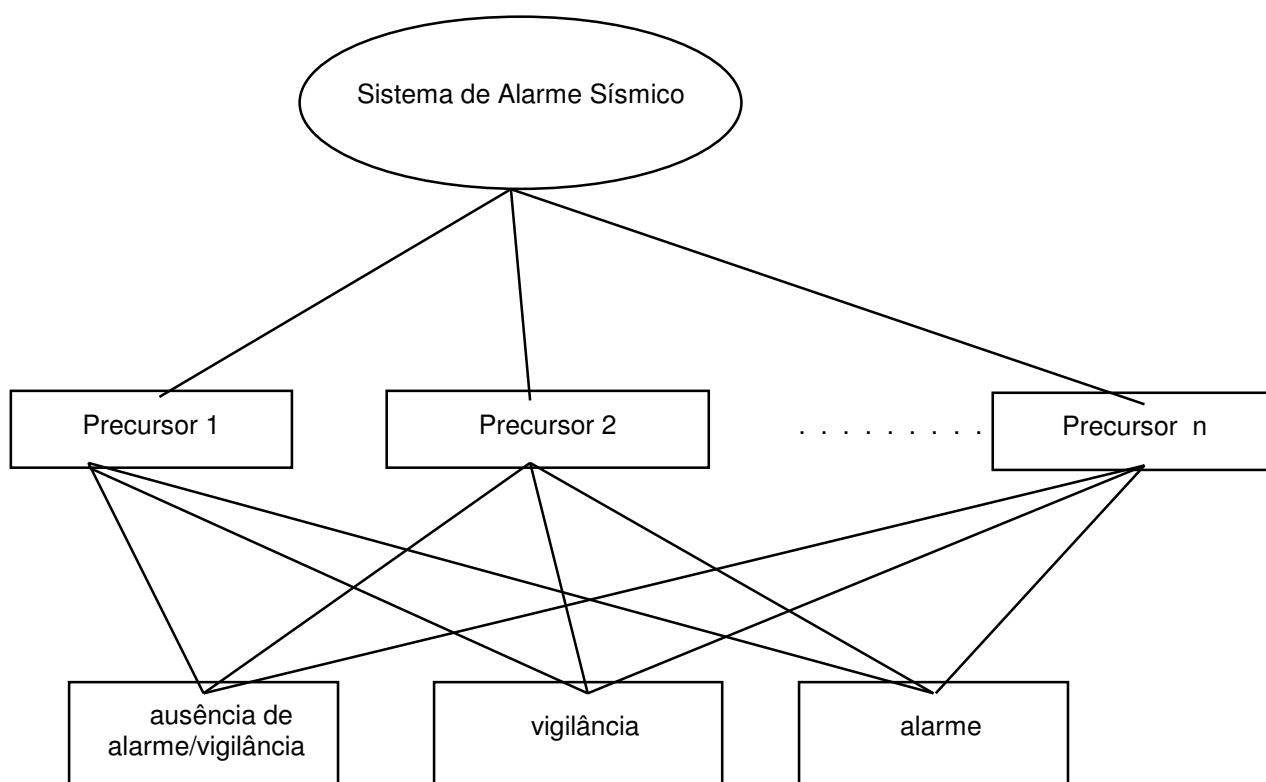


Figura 2.3.1 - Representação do Sistema de Alarme Sísmico proposto

Deve referir-se a questão dos horizontes temporais para os quais se determina o grau de alarme. Como se referirá, os precursores fornecem informação para um determinado horizonte temporal, que é função do precursor em causa e da região em estudo. Desta forma pode não ser possível incorporar informação relativa a todos os precursores sísmicos utilizados, durante um horizonte temporal.

Por exemplo, para avaliar as variações na concentração dos teores de Radão nas águas dos poços profundos é necessário um horizonte temporal significativamente maior do que para analisar os precursores utilizados nesta Dissertação (*condições iniciais e sismicidade local*).

Como se referiu, utilizaram-se os dois precursores sísmicos seguintes:

- as *Condições Iniciais* do modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas utilizado (Costa, 1989), que contém informação sobre as duas últimas ocorrências sísmicas na Península Ibérica, correspondendo ao passado sísmico recente;
- a *Sismicidade Local*, ou seja o número de ocorrências sísmicas de qualquer magnitude, registadas na região em estudo, durante um horizonte temporal.

Nos capítulos 5 e 6 descreve-se, respectivamente, a metodologia proposta para a determinação dos graus de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, merecendo especial destaque a utilização da Teoria dos Conjuntos Vagos (veja-se 2.1.4) para a determinação do grau de alarme relativo a cada precursor utilizado.

No capítulo 7 determinam-se as medidas de desempenho dos precursores utilizados. Finalmente, no capítulo 8 apresenta-se uma metodologia de determinação do Grau de Alarme Total, a partir de uma média pesada dos diversos valores de grau de alarme, relativos a cada precursor. Para a determinação dos referidos “pesos”, utiliza-se a teoria AHP (Analytic Hierarchy Process) (veja-se 2.1.3).

Dado que o grau de alarme sísmico deve ser determinado para uma região, e dada a extensão da Península Ibérica, optou-se, sem perda de generalidade, por seleccionar duas regiões sísmicas a estudar:

- Região de Lisboa - constituída pelas *zonas sísmicas* números 1 e 7 e
- Região da Andaluzia - constituída pelas *zonas sísmicas* números 2 e 3.

A região de Lisboa, além de ser densamente povoada, possui registos sísmicos de forte magnitude, ocorridos este século, em Benavente.

Por outro lado, a região da Andaluzia, embora não tenha registado ocorrências de magnitude tão forte quanto a região de Lisboa, é constituída pelas *zonas sísmicas* com maior número de ocorrências de toda a Península Ibérica.

Considerou-se assim ilustrativo o estudo destas duas regiões. Aliás o estudo das restantes regiões pode fazer-se de forma análoga à efectuada para as duas regiões sísmicas estudadas.

	Região de Lisboa	Região da Andaluzia	Península Ibérica
nº total de ocorrências	810	2492	11394
nº de ocorrências de fraca magnitude ($G < 4$)	696 (85.9%)	2213 (88.8%)	9968 (87.5%)
nº de ocorrências de média magnitude ($4 \leq G < 5$)	97 (12.0%)	248 (10.0%)	1261 (11.1%)
nº de ocorrências de forte magnitude ($G \geq 5$)	17 (2.1%)	31 (1.2%)	165 (1.4%)
Valor Médio de G	3.6	3.3	3.4
Valor máximo de G	6.3	7.0	7.3

Quadro 2.3.1 - Estatísticas de ocorrências sísmicas, na Península Ibérica e nas duas regiões estudadas

O quadro 2.3.1 apresenta algumas estatísticas de ocorrências sísmicas, registadas após 1900, na Península Ibérica, e nas regiões de Lisboa e Andaluzia.

2.4 - Conclusão

Apresentou-se uma descrição muito sumária dos métodos que serão utilizados em análises posteriores.

Fez-se também referencia aos dados disponíveis (2.2), realçando-se os precursores sísmicos que não puderam ser considerados, por não existirem dados disponíveis para a Península Ibérica.

Na secção 2.3 apresentou-se a metodologia proposta para o Sistema de Alarme Sísmico que se pretende construir, e que será desenvolvida nos capítulos seguintes.

Capítulo 3

ANÁLISE DO PRECURSOR CONDIÇÕES INICIAIS

3.1 - Introdução

Neste capítulo estuda-se o precursor *Condições Iniciais* do modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica utilizado (Costa, 1989), que grosso modo, se pode considerar correspondente ao “passado sísmico recente”.

Em 3.2 estudam-se vários cenários sísmicos particulares e, conseqüentemente, as *condições iniciais* que lhes estão associadas, sendo o objectivo comparar cenários sísmicos concretos. Em 3.3 estudam-se *condições iniciais* cujos valores são gerados de forma aleatória, permitindo assim um estudo mais geral, nomeadamente o estudo da influência dos factores *Tempo*, *Grandeza* e *Espaço* no processo de ocorrências sísmicas da Península Ibérica.

Pode ter utilidade comparar vários cenários sísmicos particulares. Por exemplo, comparar uma situação sísmica actual com uma que tenha ocorrido há algum tempo. É comum, especialmente nos órgãos de comunicação social, aquando da ocorrência de um sismo, efectuar comparações com uma “crise sísmica” que tenha ocorrido na mesma região há algum tempo. É também comum efectuar comparações entre cenários sísmicos ocorridos na mesma época mas em regiões diferentes.

Em todas estas situações reveste-se de especial interesse a estimação e comparação da probabilidade de ocorrência de um sismo de forte magnitude, numa determinada região, durante um certo período de tempo.

Como já se referiu (veja-se 2.1.2), para simular o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica utilizou-se o modelo proposto por Costa (Costa, 1989).

Recorde-se que, neste modelo, cada ocorrência é caracterizada por três factores: **Tempo**, **Grandeza** e **Espaço**. O factor **Tempo** é caracterizado pelos valores dos intervalos de tempo entre sismos consecutivos (**Dt**); a **Grandeza** (**G**) é caracterizada pelos valores de magnitude de Richter associados às ocorrências; o **Espaço** (**E**) é caracterizado pelo número da *zona sísmica* correspondente ao epicentro da ocorrência (veja-se figura 2.1.2.1).

Seja Dt_i o intervalo de tempo que decorre entre a $(i-1)$ -ésima e a i -ésima ocorrência, e G_i e E_i , respectivamente, os valores da Grandeza e Espaço associados à i -ésima ocorrência.

De acordo com o modelo adoptado, a geração da i -ésima ocorrência é feita da seguinte forma:

- o valor do intervalo de tempo Dt_i é determinado com base nos valores dos intervalos de tempo Dt_{i-2} e Dt_{i-1} , i. e.,

$$(Dt_{i-2}, Dt_{i-1}) \rightarrow Dt_i$$

- o valor de Grandeza G_i é calculado com base em Dt_i , já determinado, e nos valores de Grandeza G_{i-1} e G_{i-2} , i. e.,

$$(Dt_i, G_{i-2}, G_{i-1}) \rightarrow G_i$$

- o valor de Espaço E_i é determinado com base em Dt_i , G_i e E_{i-1} , i. e.,

$$(Dt_i, G_i, E_{i-1}) \rightarrow E_i$$

Deste modo, para se iniciar a geração do processo de ocorrências sísmicas na península Ibérica é necessário caracterizar as **condições iniciais**, ou seja, conhecer os valores de

$$Dt_{i-2}, Dt_{i-1}, G_{i-2}, G_{i-1} \text{ e } E_{i-1}.$$

Por uma questão de simplificação de linguagem, às grandezas Dt , G e E chamar-se-á **factores** e qualquer conjunto cujos elementos sejam factores chamar-se-á **combinação de factores**.

Pretende-se saber se as *condições iniciais*, e consequentemente, as combinações de factores nelas envolvidas, influem de forma significativa no processo de ocorrências sísmicas.

Admita-se, a título de exemplo, que se pretende saber qual dos seguintes três **cenários sísmicos** torna mais provável a ocorrência de um sismo de magnitude maior ou igual a um valor previamente fixado - **G_0** , na região X , durante um determinado período de tempo:

- as duas últimas ocorrências tiveram forte magnitude, ocorreram há pouco tempo e o epicentro da última delas situou-se fora da região X ;
- as duas últimas ocorrências tiveram lugar há pouco tempo, com fraca magnitude, mas a última ocorreu na região X ;
- o epicentro da última ocorrência situou-se na região X , e tanto esta ocorrência como a que a precedeu tiveram forte magnitude mas ocorreram há já algum tempo.

Ao primeiro cenário sísmico pode-se associar a combinação de factores

Dt , G .

Neste cenário o epicentro da última ocorrência situou-se **fora** da região X , pelo que não se considera interveniente o factor Espaço - E . Por outro lado, como as duas últimas ocorrências tiveram **forte magnitude**, então a Grandeza G é um factor interveniente nesse cenário. Adicionalmente, se as duas últimas ocorrências são **recentes**, então o factor Tempo (Dt) é interveniente nesse cenário.

A propósito deve referir-se que, estudos prévios indicaram que se as duas últimas ocorrências tiveram lugar há muito tempo, é menor a probabilidade de ocorrer um sismo de forte magnitude, do que se as duas últimas ocorrências tivessem tido lugar há pouco tempo. Esta conclusão foi tirada com base em experiências prévias, tendo-se efectuado um número elevado de simulações do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, em que se comparavam *condições iniciais* que só diferiam nos valores do Dt .

Poder-se-ia pensar que estes resultados contrariam a convicção de que “quanto maior for o intervalo de tempo entre ocorrências, maior é a energia acumulada”. No entanto, como adiante se

verá, os horizontes temporais estudados nesta Dissertação não excedem três meses, e a convicção de que quanto maior for o intervalo de tempo mais elevada será a magnitude, refere-se normalmente a períodos de tempo bem maiores do que os estudados. Além disto, no modelo de simulação utilizado, D_t representa o intervalo entre ocorrências consecutivas na Península Ibérica, ao passo que na convicção referida, o intervalo de tempo se refere a ocorrências consecutivas na mesma região.

Seguindo um raciocínio análogo, podem associar-se aos dois últimos cenários sísmicos, as seguintes combinações de factores:

D_t, E e
 $G, E.$

Se se estudarem todas as possibilidades de combinações de factores (isoladamente, dois a dois e os três) obtém-se um total de sete combinações:

D_t
 G
 E
 D_t, G
 D_t, E
 G, E
 $D_t, G, E.$

Poder-se-á perguntar se ao estudar factores não se deveria estudar também os seus parâmetros, por exemplo ao estudar G deveria estudar-se G_{i-2} , G_{i-1} ou $G_{i-2:i-1}$?

No caso de estudarmos ambos os parâmetros dos factores D_t e G , não teríamos 7 possibilidades mas sim 31, conforme se apresenta no quadro 3.1.1. Neste caso o símbolo “♦” representa influência do correspondente parâmetro.

Dada a morosidade deste estudo, e também porque o objectivo não é estudar todas as possibilidades, mas sim apresentar uma metodologia que permita comparar **quaisquer condições iniciais**, sejam muitas ou poucas, optou-se por estudar apenas as *condições iniciais* em que há, para os factores Tempo e Grandeza, influência dos factores das duas últimas ocorrências. No quadro 3.1.1 essas *condições iniciais* apresentam-se numeradas na primeira coluna.

C.l. nº	Dt		G		E	factores em estudo
	i-2	i-1	i-2	i-1		
		♦				Dt
	♦					Dt
1	♦	♦				Dt
				♦		G
			♦			G
2			♦	♦		G
3					♦	E
		♦		♦		Dt, G
		♦	♦			Dt, G
	♦			♦		Dt, G
	♦		♦			Dt, G
	♦	♦		♦		Dt, G
	♦	♦	♦			Dt, G
		♦	♦	♦		Dt, G
	♦		♦	♦		Dt, G
4	♦	♦	♦	♦		Dt, G
		♦			♦	Dt, E
	♦				♦	Dt, E
5	♦	♦			♦	Dt, E
				♦	♦	G, E
			♦		♦	G, E
6			♦	♦	♦	G, E
		♦		♦	♦	Dt, G, E
		♦	♦		♦	Dt, G, E
	♦			♦	♦	Dt, G, E
	♦		♦		♦	Dt, G, E
	♦	♦		♦	♦	Dt, G, E
	♦	♦	♦		♦	Dt, G, E
		♦	♦	♦	♦	Dt, G, E
	♦		♦	♦	♦	Dt, G, E
7	♦	♦	♦	♦	♦	Dt, G, E

Quadro 3.1.1 - Possibilidades de combinações de parâmetros

Desta forma, quando se estuda a influência de Dt, utilizam-se pequenos valores de Dt_{i-2} e Dt_{i-1} , (ambos os parâmetros de Dt), o que significa que se simula um processo de ocorrências sísmicas partindo de um cenário sísmico em que as duas últimas ocorrências tiveram lugar há pouco tempo. Analogamente, quando se estuda o factor Grandeza, utilizam-se valores elevados para G_{i-2} e G_{i-1} .

O estudo da influência das *condições iniciais* no processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica vai ser feito com base nas 7 combinações de factores referidas.

Dado que o modelo utilizado na simulação do processo de ocorrências sísmicas abrange toda a Península Ibérica, e esta é uma região demasiado extensa para ser estudada globalmente, seleccionam-se as seguintes duas regiões sísmicas:

- Lisboa (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 1 e 7) e
- Andaluzia (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 2 e 3).

A região de Lisboa foi escolhida, dado o facto de ser uma região com elevada densidade populacional e por ter registado, já neste século, sismos de elevada magnitude.

A escolha da região da Andaluzia, deve-se ao facto de englobar, as *zonas sísmicas* números 2 e 3, que possuem a maior frequência de abalos sísmicos da Península Ibérica.

O estudo da influência das *condições iniciais* fez-se para 4 **horizontes temporais** - **T0**:

- 7 dias
- 15 dias
- 30 dias
- 90 dias

e para 2 níveis de magnitude:

- sismos de média magnitude - $4 \leq G < 5$
- sismos de forte magnitude - $G \geq 5$.

A comparação das *condições iniciais* foi feita com base em simulações do processo de ocorrências sísmicas, tendo-se utilizado as seguintes **medidas de performance**:

- ***r*** - número de simulações em que se verificou, **pelo menos**, uma ocorrência de magnitude superior ou igual a G_0 (ou entre dois valores estabelecidos de magnitude)

na região X, durante o horizonte temporal T0, sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico (*condição inicial*).

- \bar{s} : número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a G0 (ou entre dois valores estabelecidos de magnitude) que ocorreram na região X, durante o período de tempo T0, sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico (*condição inicial*).

Note-se que, se se efectuarem n simulações de processo de ocorrências sísmicas, $p = r / n$ representa uma estimativa da probabilidade de ocorrer **pelo menos um** sismo de magnitude superior ou igual a G0, na região X, durante o horizonte temporal T0, sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico.

Porém, esta medida de performance não permite saber se durante o período de tempo T0 ocorreriam ou não outros abalos sísmicos. Por este motivo, utilizaram-se ambas as medidas de performance.

Como se pretende estudar as sete combinações de factores referidos, é difícil compará-los globalmente sem os comparar primeiramente dois a dois. Utilizou-se a metodologia **AHP - Analytic Hierarchy Process** (Saaty, 1990) (veja-se 2.1.3), já que esta permite estudar a influência global de cada combinação de factores utilizando comparações entre pares de combinações deles.

A comparação de cenários sísmicos vai ser feita de duas maneiras distintas: na primeira arbitram-se valores de *condições iniciais* por forma a exprimirem influência de um factor (ou combinação de factores), simula-se o processo de ocorrências sísmicas e efectua-se a média dos resultados obtidos, para cada uma das *condições iniciais* utilizados.

No segundo processo os valores das *condições iniciais* não são arbitrados mas sim gerados aleatoriamente, dentro de certos intervalos, permitindo assim uma análise muito mais ampla e significativa.

De referir, no entanto, que o primeiro processo permite a comparação de **cenários sísmicos reais**, por exemplo determinar, de entre vários **cenários sísmicos reais**, qual o mais preocupante.

3.2 - Estudo comparativo de *condições iniciais* arbitradas

Pretende estudar a influência de *condições iniciais* arbitradas no processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica. Tal significa que as *condições iniciais* a comparar têm valores fixos, podendo inclusivamente representar **cenários sísmicos reais**, ou seja, **situações que ocorreram efectivamente no processo de ocorrências sísmicas** da Península Ibérica.

Por exemplo, pretende-se saber se é mais provável a ocorrência de um sismo de forte magnitude, num futuro próximo, no Algarve ou na região dos Pirinéus.

Pretendemos assim comparar dois cenários sísmicos reais e, consequentemente duas *condições iniciais* reais.

Quando se pretende comparar probabilidades de ocorrência, a “medida de comparação” utilizada deve ser r , ou seja, a probabilidade de ocorrência de, pelo menos, um sismo de magnitude superior ou igual a um valor - G_0 , na região X , durante o horizonte temporal T_0 , sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico.

Por outro lado, se se pretender saber qual o cenário sísmico que, “em média”, conduz a um maior número de abalos sísmicos de forte magnitude, a medida de performance a utilizar deve ser \bar{s} : número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a G_0 (ou entre dois valores estabelecidos de magnitude) que ocorreram na região X , durante o período de tempo T_0 , sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico (*condição inicial*). Note-se, no entanto, que esta medida não fornece um valor de probabilidade.

Como normalmente se utilizam valores de probabilidades de ocorrência para comparar cenários sísmicos reais, optou-se por utilizar r no estudo comparativo de *condições iniciais* arbitradas. Utilizou-se \bar{s} para o estudo efectuado em 3.3, já que aí se pretende saber, qual ou quais os factores que, “em média”, conduzem um maior número de sismos de forte magnitude.

Considerem-se então dois cenários sísmicos e a primeira medida de performance referida. Através dela pretende-se saber qual dos dois cenários sísmicos é “mais importante”, ou melhor dizendo, “mais preocupante”.

Partindo de duas *condições iniciais*, cada uma delas relativa a um cenário, sejam elas a *condição inicial A* e a *condição inicial B*, efectuam-se n simulações do processo de ocorrências sísmicas, durante um período de tempo T_0 . Contabiliza-se o número de simulações em que se verificou pelo menos uma ocorrência de magnitude superior ou igual a G_0 (ou entre dois valores

estabelecidos de magnitude) na região X. Seja $r1$ esse valor para a *condição inicial A* e $r2$ para a *condição inicial B*.

Se por exemplo $r1 = 200$, $p1 = r1 / n$ é uma estimativa da probabilidade de se verificar pelo menos uma ocorrência de magnitude superior ou igual a $G0$, na região X, durante o período de tempo $T0$, **sabendo-se que** se partiu de um cenário correspondente à *condição inicial A*.

Analogamente, se $r2 = 100$, $p2 = r2 / n$ é uma estimativa da probabilidade de se verificar pelo menos uma ocorrência de magnitude superior ou igual a $G0$, na região X, durante o período de tempo $T0$, **sabendo-se que** se partiu de um cenário correspondente à *condição inicial B*.

Parece razoável admitir que a *condição inicial A* é duas vezes "mais importante" ou "mais preocupante" do que a *condição inicial B*, já que $p1 / p2 = 200 / 100 = 2$.

Se para apenas duas *condições iniciais* é "fácil" determinar quantas vezes uma *condição inicial* é "mais importante" do que a outra, para várias *condições iniciais* o processo de comparação é complicado.

Recorde-se que, conforme referido em 3.1, o estudo da influência das *condições iniciais* no processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica vai ser feito com base nas seguintes 7 combinações de factores:

Dt
G
E
Dt, G
Dt, E
G, E
Dt, G, E.

Para estudar a influência dos factores (ou combinações deles) nas *condições iniciais* utilizou-se a metodologia **AHP - Analytic Hierarchy Process** (Saaty, 1990), já que este método permite estudar a influência global de cada combinação de factores utilizando comparações entre pares de combinações deles.

Para se utilizar este método, tem de se construir a **matriz de julgamentos** (veja-se 2.1.3) para as sete combinações de factores envolvidas: Dt; G; E; Dt,G; Dt,E; G,E e Dt,G,E.

Nesta matriz cada elemento $a(i, j)$ tem o seguinte significado: se $a(i, j) = k$, então a combinação de factores da linha i é k vezes "mais importante" do que a combinação de factores da coluna j .

Os elementos da diagonal valem 1, já que cada combinação de factores vale tanto quanto ela própria. Os restantes elementos da matriz são recíprocos, ou seja, $a(i, j) = 1 / a(j, i)$, $i \neq j$.

Para aplicar a metodologia AHP ao estudo das sete combinações de factores que se pretendem estudar é necessário construir uma matriz quadrada de ordem 7, e efectuar 21 comparações, já que, numa *matriz de julgamentos* é necessário efectuar $m \cdot (m - 1) / 2$ comparações, sendo m o número de características a comparar. De lembrar que os elementos da diagonal valem 1, e a matriz é recíproca (veja-se 2.1.3).

Para cada combinação de factores efectuaram-se n simulações do processo de ocorrências sísmicas e contabilizou-se, para cada caso, o número de simulações em que se obteve pelo menos uma ocorrência de magnitude maior ou igual a G_0 . Designem-se esses valores por:

- r_A - para a *condição inicial A* relativa a Dt
- r_B - para a *condição inicial B* relativa a G
- r_C - para a *condição inicial C* relativa a E
- r_D - para a *condição inicial D* relativa a Dt, G
- r_E - para a *condição inicial E* relativa a Dt, E
- r_F - para a *condição inicial F* relativa a G, E
- r_G - para a *condição inicial G* relativa a Dt, G, E.

A *matriz de julgamentos* é então construída da seguinte forma:

	Dt	G	E	Dt,G	Dt,E	G,E	Dt,G,E
Dt	1	r_A/r_B	r_A/r_C	r_A/r_D	r_A/r_E	r_A/r_F	r_A/r_G
G	r_B/r_A	1	r_B/r_C	r_B/r_D	r_B/r_E	r_B/r_F	r_B/r_G
E	r_C/r_A	r_C/r_B	1	r_C/r_D	r_C/r_E	r_C/r_F	r_C/r_G
Dt,G	r_D/r_A	r_D/r_B	r_D/r_C	1	r_D/r_E	r_D/r_F	r_D/r_G
Dt,E	r_E/r_A	r_E/r_B	r_E/r_C	r_E/r_D	1	r_E/r_F	r_E/r_G
G,E	r_F/r_A	r_F/r_B	r_F/r_C	r_F/r_D	r_F/r_E	1	r_F/r_G
Dt,G,E	r_G/r_A	r_G/r_B	r_G/r_C	r_G/r_D	r_G/r_E	r_G/r_F	1

Uma vez formada a *matriz de julgamentos* é possível calcular o **vector de prioridades** correspondente, bastando para tal determinar o vector próprio principal da *matriz de julgamentos* e normalizá-lo, obtendo-se:

$$[P_{Dt} \ P_G \ P_E \ P_{Dt,G} \ P_{Dt,E} \ P_{G,E} \ P_{Dt,G,E}]^T.$$

O *vector de prioridades* indica a "importância" percentual de cada uma das combinações de factores estudadas, permitindo assim saber, de entre os cenários comparados, qual a combinação de factores que torna mais provável a ocorrência de um sismo de elevada magnitude, bastando para tal verificar qual a componente com maior valor.

3.2.1 - Experiências efectuadas

Para se poder calcular o *vector de prioridades*, há que definir um conjunto de 7 *condições iniciais*, tais que cada uma delas possa exprimir a influência de uma combinação de factores.

Para atenuar a influência de uma escolha particular de conjunto de *condições iniciais*, definiram-se 3 conjuntos das mesmas, ou seja, 3 conjuntos de 7 *condições iniciais* cada, calculando-se depois a média das componentes dos vectores de prioridades relativos a cada combinação de factores.

O estudo da influência dos factores vai ser feito do seguinte modo:

- se se pretender estudar a influência do factor D_t , a *condição inicial* correspondente a este factor deverá possuir valores reduzidos de D_{t-2} e D_{t-1} , tendo G_{i-2} e G_{i-1} valores próximos do valor médio da distribuição empírica de G , e tendo E_{i-1} um valor correspondente a uma *zona sísmica* fora da região em estudo;
- quando se pretende estudar a influência de G , G_{i-2} e G_{i-1} devem ter valores elevados, D_{t-2} e D_{t-1} devem possuir valores próximos do valor médio da distribuição empírica de D_t e E_{i-1} deve ter um valor correspondente a uma *zona sísmica* fora da região em estudo;
- quando se pretende estudar o factor E , E_{i-1} deve ter o valor de uma das *zonas sísmicas* da região em estudo, tendo os restantes factores valores próximos dos valores médios das correspondentes distribuições empíricas.

Quando um factor não é objecto de estudo, o seu valor, nas *condições iniciais*, deve situar-se próximo do valor médio da correspondente distribuição empírica, excepto para o factor E, cujo valor deve corresponder a uma *zona sísmica* fora da região em estudo.

No quadro 3.2.1.1 apresenta-se algumas estimativas de quantis e do valor médio das distribuições empíricas de Dt e de G. Para maior facilidade de leitura, os valores de Dt são apresentados no formato **dd:hh:mm:ss** (dia:hora:minuto:segundo).

quantil	20 %	40 %	60 %	80 %	valor médio
Dt	00:01:59:43.9	00:12:24:11.8	01:08:46:35.1	03:16:47:35.0	02:22:04:48.0
G	2.8	3.2	3.5	3.9	3.4

Quadro 3.2.1.1 - Estatísticas de Dt e G

Os quadros 3.2.1.2 a 3.2.1.7 apresentam os valores das *condições iniciais* utilizadas (quadros 3.2.1.2 a 3.2.1.4 para a região de Lisboa e quadros 3.2.1.5 a 3.2.1.7 para a região da Andaluzia).

Região de Lisboa

C. l. nº	Dt		G		E i-1	factores em estudo
	i-2	i-1	i-2	i-1		
1	00:00:05:15.4	00:00:15:46.1	3.2	2.9	13	Dt
2	00:20:08:52.8	01:17:10:19.2	4.8	6.0	13	G
3	00:21:01:26.4	01:18:02:52.8	3.3	3.4	7	E
4	00:00:47:18.2	00:00:31:32.2	6.5	7.0	12	Dt, G
5	00:00:42:28.9	00:00:15:46.1	3.1	3.4	7	Dt, E
6	00:17:31:12.0	01:19:48:00.0	4.5	6.0	7	G, E
7	00:00:05:15.4	00:00:15:46.1	4.2	6.0	7	Dt, G, E

Quadro 3.2.1.2 - Primeiro conjunto de *condições iniciais* utilizado para a região de Lisboa

C. l. nº	Dt		G		E i-1	factores em estudo
	i-2	i-1	i-2	i-1		
1	00:07:53:02.4	00:04:22:48.0	3.1	3.0	20	Dt
2	01:01:24:14.4	02:04:33:36.0	5.2	5.7	12	G
3	00:17:31:12.0	01:02:16:48.0	2.8	3.3	7	E
4	00:04:22:48.0	00:07:53:02.4	5.0	6.8	13	Dt, G
5	00:06:07:55.2	00:03:30:14.4	2.2	3.0	7	Dt, E
6	01:02:16:48.0	00:17:31:12.0	4.8	5.3	7	G, E
7	00:00:36:47.5	00:00:26:16.8	4.9	7.0	7	Dt, G, E

Quadro 3.2.1.3 - Segundo conjunto de *condições iniciais* utilizado para a região de Lisboa

C. l. nº	Dt		G		E i-1	factores em estudo
	i-2	i-1	i-2	i-1		
1	00:00:52:33.6	00:00:26:16.8	2.8	2.0	12	Dt
2	00:20:08:52.8	03:06:50:24.0	6.0	7.0	12	G
3	00:21:01:26.4	02:22:04:48.0	3.3	3.4	7	E
4	00:00:10:30.7	00:00:26:16.8	5.5	6.1	12	Dt, G
5	00:00:52:33.6	00:00:42:02.9	2.7	3.4	7	Dt, E
6	01:11:02:24.0	00:08:45:36.0	3.3	3.9	7	G, E
7	00:07:00:28.8	00:07:53:02.4	5.9	6.8	7	Dt, G, E

Quadro 3.2.1.4 - Terceiro conjunto de *condições iniciais* utilizado para a região de Lisboa

Região da Andaluzia

Os valores das *condições iniciais* utilizados para esta região são iguais aos utilizados para a região de Lisboa, excepto nos casos em que está envolvido o factor Espaço, já que para esta região E_{i-1} toma o valor 2 ou 3.

C. l. nº	Dt		G		E i-1	factores em estudo
	i-2	i-1	i-2	i-1		
1	00:00:05:15.4	00:00:15:46.1	3.2	2.9	13	Dt
2	00:20:08:52.8	01:17:10:19.2	4.8	6.0	13	G
3	00:21:01:26.4	01:18:02:52.8	3.3	3.4	3	E
4	00:00:47:18.2	00:00:31:32.2	6.5	7.0	12	Dt, G
5	00:00:42:28.9	00:00:15:46.1	3.1	3.4	2	Dt, E
6	00:17:31:12.0	01:19:48:00.0	4.5	6.0	3	G, E
7	00:00:05:15.4	00:00:15:46.1	4.2	6.0	3	Dt, G, E

Quadro 3.2.1.5 - Primeiro conjunto de *condições iniciais* utilizado para a região da Andaluzia

C. l. nº	Dt		G		E i-1	factores em estudo
	i-2	i-1	i-2	i-1		
1	00:07:53:02.4	00:04:22:48.0	3.1	3.0	20	Dt
2	01:01:24:14.4	02:04:33:36.0	5.2	5.7	12	G
3	00:17:31:12.0	01:02:16:48.0	2.8	3.3	2	E
4	00:04:22:48.0	00:07:53:02.4	5.0	6.8	13	Dt, G
5	00:06:07:55.2	00:03:30:14.4	2.2	3.0	3	Dt, E
6	01:02:16:48.0	00:17:31:12.0	4.8	5.3	2	G, E
7	00:00:36:47.5	00:00:26:16.8	4.9	7.0	3	Dt, G, E

Quadro 3.2.1.6 - Segundo conjunto de *condições iniciais* utilizado para a região da Andaluzia

C. l. nº	Dt		G		E i-1	factores em estudo
	i-2	i-1	i-2	i-1		
1	00:00:52:33.6	00:00:26:16.8	2.8	2.0	12	Dt
2	00:20:08:52.8	03:06:50:24.0	6.0	7.0	12	G
3	00:21:01:26.4	02:22:04:48.0	3.3	3.4	2	E
4	00:00:10:30.7	00:00:26:16.8	5.5	6.1	12	Dt, G
5	00:00:52:33.6	00:00:42:02.9	2.7	3.4	3	Dt, E
6	01:11:02:24.0	00:08:45:36.0	3.3	3.9	3	G, E
7	00:07:00:28.8	00:07:53:02.4	5.9	6.8	3	Dt, G, E

Quadro 3.2.1.7 - Terceiro conjunto de *condições iniciais* utilizado para a região da Andaluzia

Para cada região estudada e para cada *condição inicial*, efectuaram-se 10000 simulações do processo de ocorrências sísmicas (veja-se 2.1.2), durante o período de tempo T_0 , tendo-se contabilizado, para cada caso, o número de simulações em que se verificou pelo menos uma ocorrência de magnitude:

- $4 \leq G < 5$ e
- $G \geq 5$.

Com estes valores determinaram-se as *matrizes de julgamentos* e correspondentes vectores de prioridades.

Note-se que, para este estudo, foi necessário determinar 336 *matrizes de julgamentos* e correspondentes vectores de prioridades

$$\begin{aligned} & \text{n}^\circ \text{ de conjuntos de } \textit{condições iniciais} \times \\ & \times (\text{n}^\circ \text{ de regiões} \times \text{n}^\circ \text{ de horizontes temporais} \times \text{n}^\circ \text{ } \textit{condições iniciais} \times \text{n}^\circ \text{ níveis de mag.}) = \\ & = 3 \times (2 \times 4 \times 7 \times 2) = 336. \end{aligned}$$

Como se utilizaram 3 conjuntos de *condições iniciais* para estudar a influência dos factores no processo de ocorrências sísmicas, existem 3 valores da componente do *vector de prioridades*, correspondente a cada combinação de factores, donde é necessário efectuar a média dos três valores.

Por exemplo, para a região de Lisboa, para $T_0 = 7$ dias e para $4 \leq G < 5$ existem 3 valores da componente do *vector de prioridades* correspondente ao factor D_t .

Nos quadros seguintes apresenta-se a média das componentes dos vectores de prioridades correspondentes a cada combinação de factores estudada.

T0	G	Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
7 dias	$4 \leq G < 5$	0.114	0.142	0.105	0.172	0.133	0.154	0.180
	$G \geq 5$	0.115	0.154	0.093	0.177	0.123	0.169	0.169
15 dias	$4 \leq G < 5$	0.123	0.136	0.124	0.159	0.136	0.152	0.169
	$G \geq 5$	0.110	0.143	0.098	0.170	0.134	0.150	0.196
30 dias	$4 \leq G < 5$	0.133	0.137	0.129	0.157	0.137	0.147	0.159
	$G \geq 5$	0.128	0.152	0.135	0.155	0.131	0.148	0.154
90 dias	$4 \leq G < 5$	0.140	0.141	0.136	0.146	0.141	0.146	0.149
	$G \geq 5$	0.144	0.134	0.130	0.156	0.144	0.138	0.155

Quadro 3.2.1.8 - Vectores de prioridades para a Região de Lisboa

T0	G	Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
7 dias	$4 \leq G < 5$	0.119	0.131	0.106	0.158	0.157	0.149	0.181
	$G \geq 5$	0.093	0.140	0.100	0.165	0.146	0.164	0.194
15 dias	$4 \leq G < 5$	0.124	0.137	0.124	0.154	0.148	0.149	0.164
	$G \geq 5$	0.117	0.139	0.110	0.175	0.130	0.149	0.181
30 dias	$4 \leq G < 5$	0.143	0.139	0.129	0.151	0.146	0.145	0.156
	$G \geq 5$	0.118	0.145	0.127	0.153	0.140	0.151	0.166
90 dias	$4 \leq G < 5$	0.140	0.139	0.138	0.144	0.146	0.146	0.148
	$G \geq 5$	0.134	0.145	0.132	0.151	0.145	0.144	0.149

Quadro 3.2.1.9 - Vectores de prioridades para a Região da Andaluzia

As figuras 3.2.1.1 a 3.2.1.4 contêm a mesma informação do que estes dois últimos quadros, mas utilizou-se outro tipo de representação.

Região de Lisboa

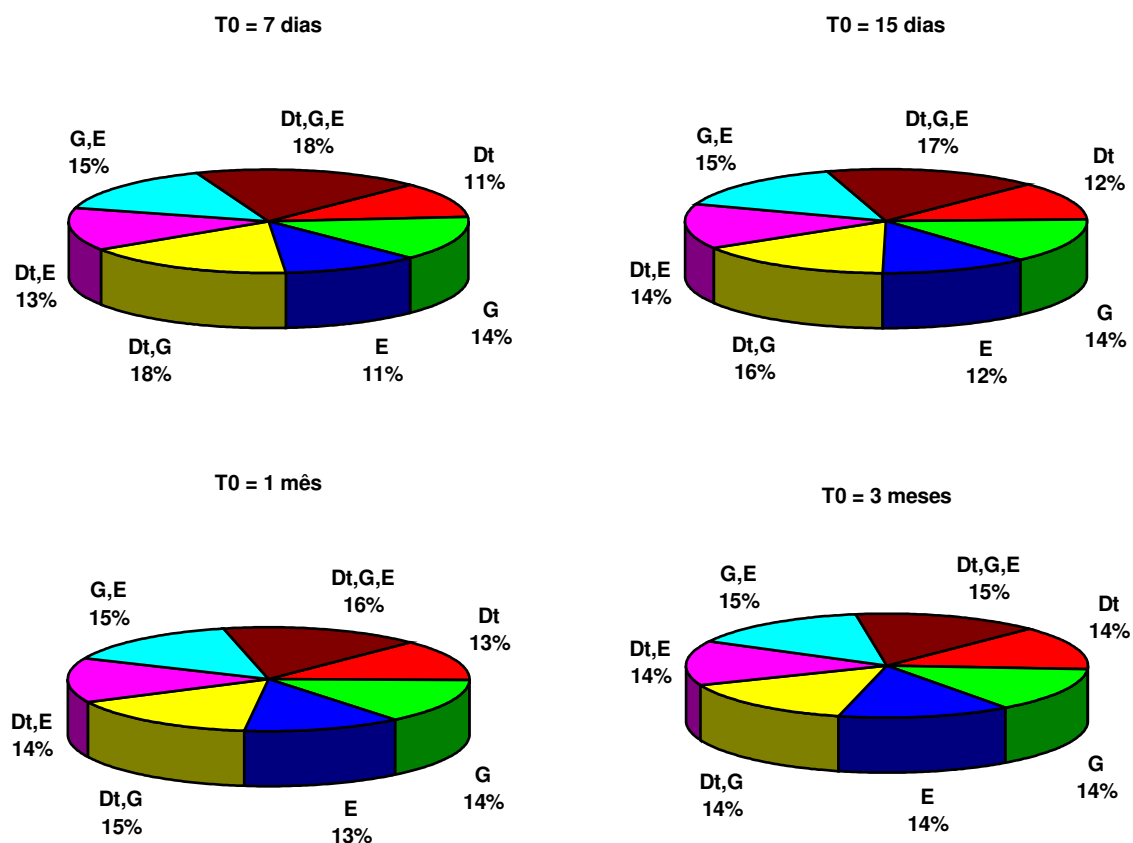


Figura 3.2.1.1 - *Vectores de prioridades* para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $4 \leq G < 5$

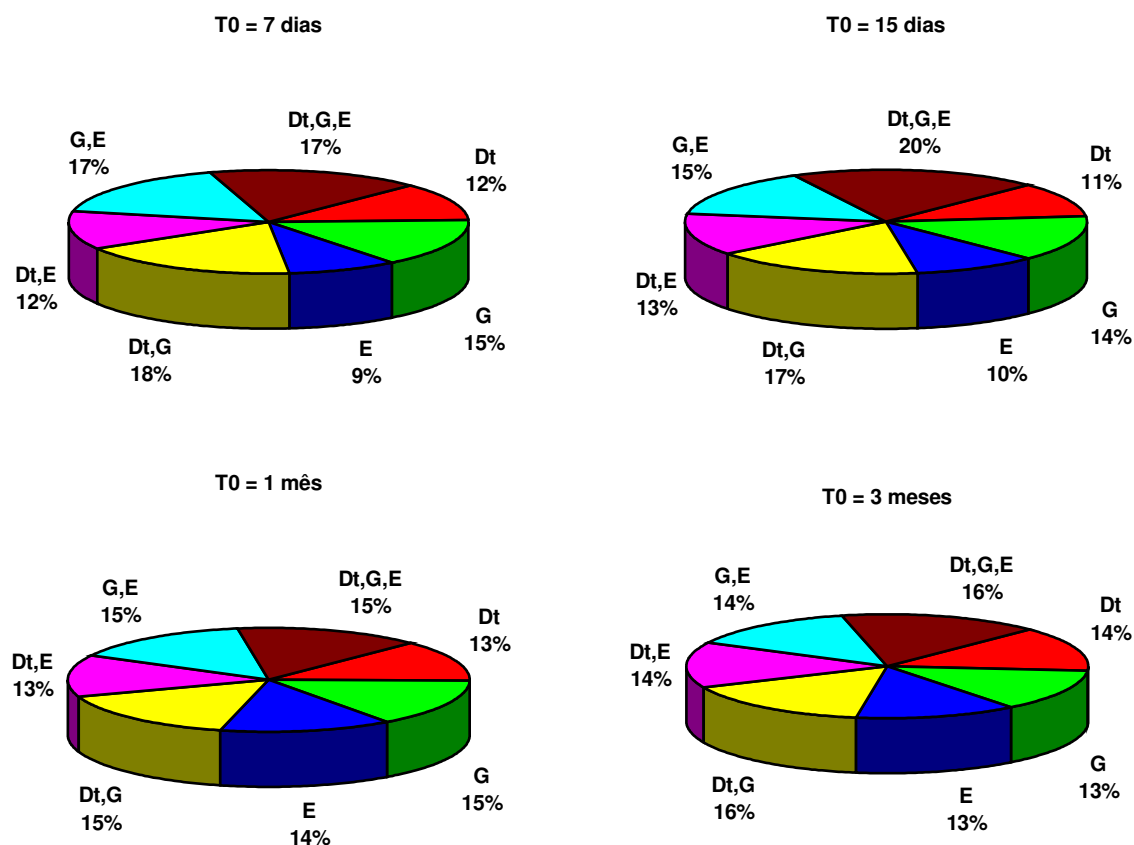


Figura 3.2.1.2 - *Vectores de prioridades* para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $G \geq 5$

Região da Andaluzia

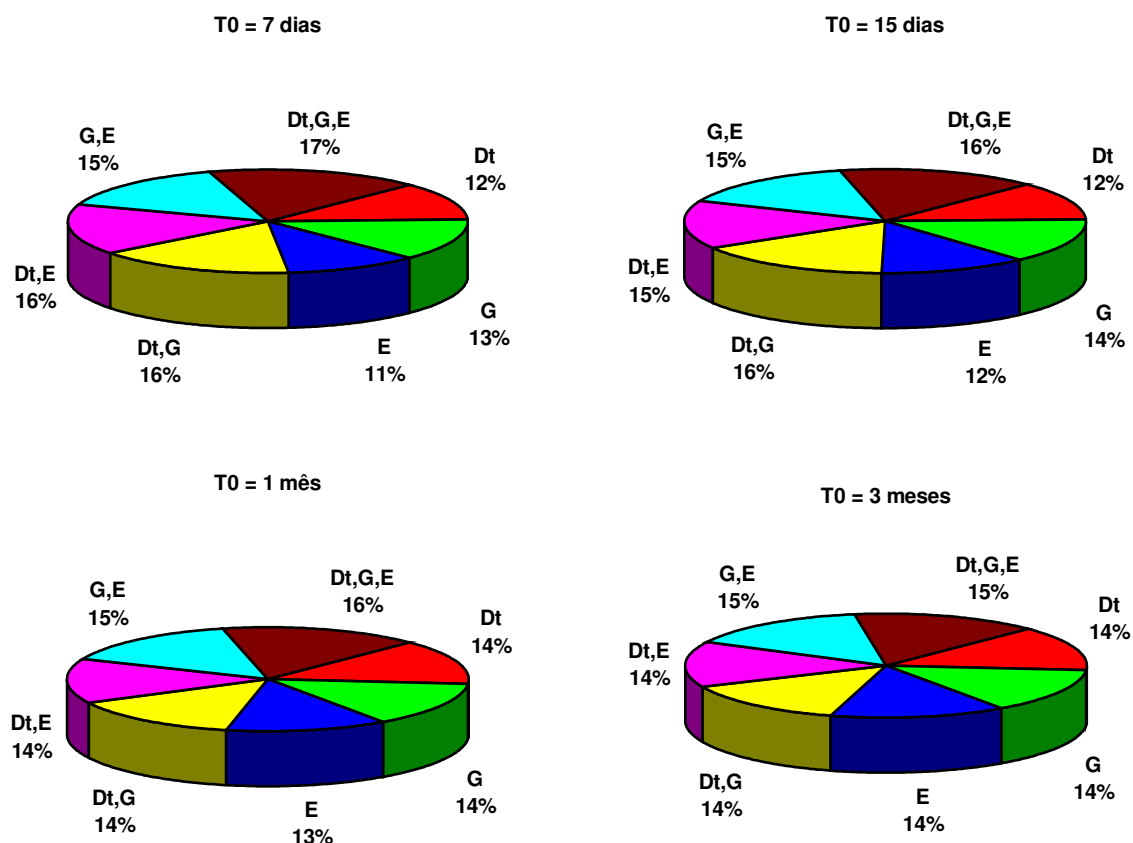


Figura 3.2.1.3 - Vectors de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $4 \leq G < 5$

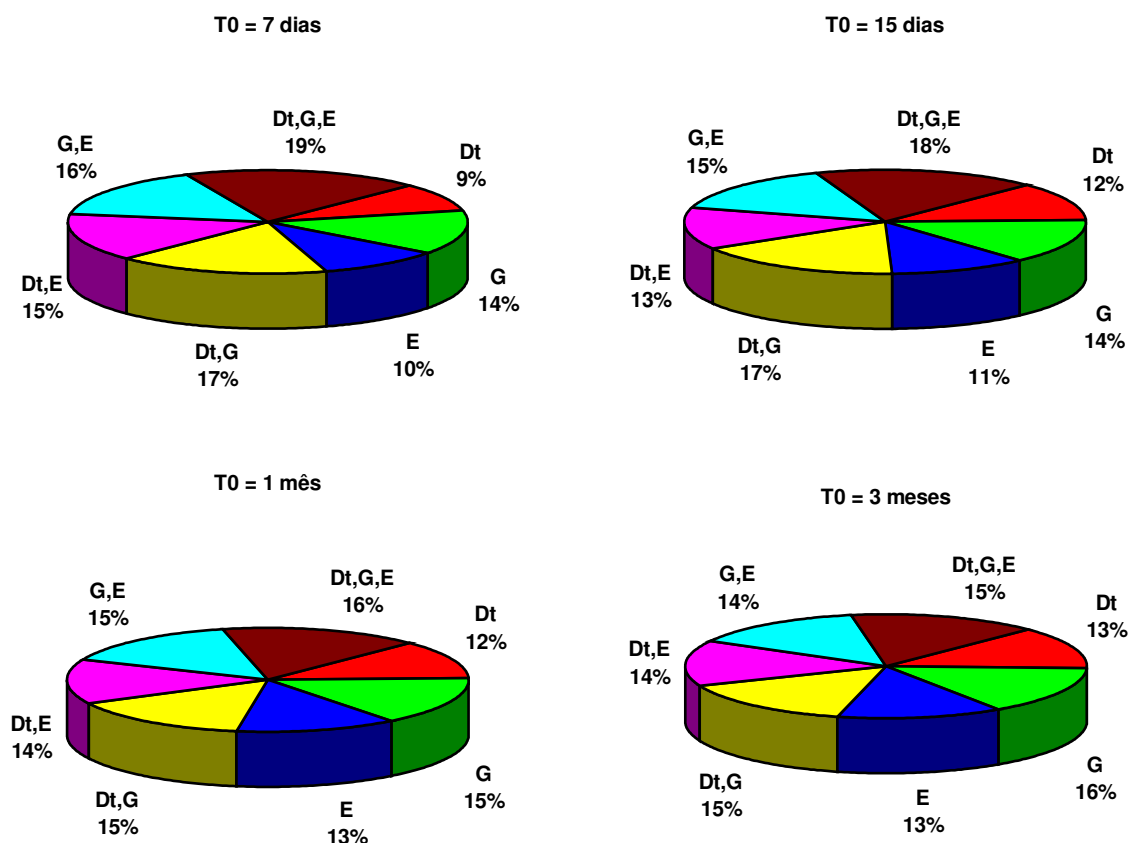


Figura 3.2.1.4 - Vectors de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $G \geq 5$

3.2.2 - Análise de resultados

Da análise das figuras 3.2.1.1 a 3.2.1.4 destaca-se o seguinte:

- nas duas regiões estudadas as combinações de factores predominantes mantêm-se, notando-se que existe semelhança na distribuição da contribuição relativa dos factores
- em ambas as regiões, a diferenciação das componentes dos *vectores de prioridades* vai diminuindo à medida que T0 aumenta, podendo concluir-se que a influência das *condições iniciais* diminui com o tempo, sendo muito pequena ao fim de três meses. No entanto, para períodos de tempo de 3 meses, existe maior diferenciação (ainda que pequena) nas componentes dos *vectores de prioridades* para sismos de forte magnitude, do que para sismos de média magnitude, o que significa que a probabilidade de ocorrência de sismos de forte magnitude é mais sensível às *condições iniciais* do que a de sismos de fraca magnitude.

Para se clarificar o padrão de influência das *condições iniciais*, definiram-se 3 níveis para os valores das componentes dos *vectores de prioridades* - **p**:

- $p > 15\%$
- $13\% < p \leq 15\%$
- $p \leq 13\%$

e verificou-se quais as combinações de factores cujas componentes dos *vectores de prioridades* se situavam em cada nível. Os resultados encontram-se nos quadros 3.2.2.1 a 3.2.2.4.

Em ambas as regiões estudadas verifica-se que são predominantes (até horizontes temporais de 30 dias) as seguintes combinações de factores:

- Dt, G, E
- Dt, G

É ainda notória a influência das combinações de factores:

- G, E
- Dt, E
- G

A influência das restantes combinações de factores é pouco notória.

SISMOS MÉDIOS ($4 \leq G < 5$)

	T0 = 7 dias	T0 = 15 dias	T0 = 30 dias	T0 = 90 dias
p > 15%	Dt, G, E Dt, G G, E	Dt, G, E Dt, G G, E	Dt, G, E Dt, G	
13% < p ≤ 15%	G Dt, E	Dt, E G	G, E Dt, E G Dt	Dt, G, E Dt, G G, E G Dt, E Dt E
p ≤ 13%	Dt E	Dt E	E	

Quadro 3.2.2.1 - Representação esquemática das componentes dos *vectores de prioridades* para sismos de média magnitude na Região de Lisboa

	T0 = 7 dias	T0 = 15 dias	T0 = 30 dias	T0 = 90 dias
p > 15%	Dt, G, E Dt, G Dt, E	Dt, G, E Dt, G	Dt, G, E Dt, G	
13% < p ≤ 15%	G, E G	G, E Dt, E G	G, E Dt, E G Dt	Dt, G, E Dt, G G, E G Dt, E Dt E
p ≤ 13%	Dt E	Dt E	E	

Quadro 3.2.2.2 - Representação esquemática das componentes dos *vectores de prioridades* para sismos de média magnitude na Região da Andaluzia

Refira-se, no entanto que, à medida que o valor de T_0 aumenta, as combinações de factores vão-se concentrando no nível intermédio dos *vectores de prioridades*, o que indica que a um aumento do período de tempo corresponde uma diminuição da influência das *condições iniciais*.

SISMOS FORTES ($G \geq 5$)

	$T_0 = 7$ dias	$T_0 = 15$ dias	$T_0 = 30$ dias	$T_0 = 90$ dias
$p > 15\%$	Dt, G, E Dt, G G, E G	Dt, G, E Dt, G	Dt, G, E Dt, G G	Dt, G, E Dt, G
$13\% < p \leq 15\%$		G, E G Dt, E	G, E Dt, E E	G, E Dt, E Dt G
$p \leq 13\%$	Dt, E Dt E	Dt E	Dt	E

Quadro 3.2.2.3 - Representação esquemática das componentes dos *vectores de prioridades* para sismos de forte magnitude na Região de Lisboa

	$T_0 = 7$ dias	$T_0 = 15$ dias	$T_0 = 30$ dias	$T_0 = 90$ dias
$p > 15\%$	Dt, G, E Dt, G G, E	Dt, G, E Dt, G	Dt, G, E Dt, G G, E	Dt, G
$13\% < p \leq 15\%$	Dt, E G	G, E G	Dt, E G	Dt, G, E Dt, E G, E G Dt E
$p \leq 13\%$	Dt E	Dt, E Dt E	Dt E	

Quadro 3.2.2.4 - Representação esquemática das componentes dos *vectores de prioridades* para sismos de forte magnitude na Região da Andaluzia

Se nenhuma combinação de factores exercesse uma influência destacada, cada componente do *vector de prioridades* teria um valor próximo de $100 / 7 = 14.3$. Note-se que o nível intermédio compreende este último valor, daí que, quando T_0 aumenta as combinações de factores se vão concentrando no nível intermédio.

Para $T_0 = 3$ meses e $4 \leq G < 5$, em ambas as regiões estudadas, todos as combinações de factores se situam no nível intermédio. Quer isto dizer que, para sismos médios (magnitude entre 4 e 5), ao fim de 3 meses, os factores intervenientes nas *condições iniciais* já não exercem influência visível. No entanto, o mesmo não acontece relativamente aos sismos fortes (magnitude superior a 5). Com efeito na região de Lisboa (ver quadro 3.2.2.3), as combinações de factores Dt,G,E e Dt,G ainda são predominantes.

Como se viu, a metodologia utilizada neste estudo permite estimar a probabilidade de ocorrência de um sismo de magnitude superior a um valor fixado, durante o período de tempo T_0 , na região X, partindo-se de determinada *condição inicial*.

Partindo de uma *condição inicial* e efectuando um número elevado (**n**) de simulações do processo de ocorrências, durante o período de tempo T_0 , é possível contabilizar o número de simulações em que se verificou pelo menos uma ocorrência de magnitude superior ou igual a G_0 (ou entre dois valores estabelecidos de magnitude) na região X. Como já se referiu, designou-se por **r** esse valor.

Então, $p = r / n$ é uma estimativa pontual da probabilidade de se verificar pelo menos uma ocorrência de magnitude superior ou igual a G_0 na região X, durante o período de tempo T_0 , sabendo-se que se partiu de um cenário correspondente à *condição inicial* utilizada.

O quadro 3.2.2.5 apresenta os valores (em %) da probabilidade de se verificar pelo menos um sismo de magnitude maior ou igual a 5 na região de Lisboa durante o período T_0 , sabendo-se que se partiu de um cenário correspondente às combinações de factores estudadas.

Região de Lisboa

T0	Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
7 dias	0.50	0.67	0.40	0.77	0.53	0.73	0.73
15 dias	0.73	0.90	0.63	1.10	0.87	0.97	1.23
30 dias	1.27	1.50	1.30	1.53	1.30	1.47	1.53
90 dias	2.10	2.03	2.83	2.27	3.13	3.00	3.37

Quadro 3.2.2.5 - Probabilidade de ocorrência de um sismo forte na região de Lisboa (em %)

É interessante notar que as quatro estimativas pontuais de probabilidade, correspondentes aos quatro “horizontes temporais” permitem propor um ajustamento linear com elevado coeficiente de correlação (ρ).

Para cada combinação de factores, testou-se o ajustamento linear aos 4 valores da probabilidade correspondentes aos quatro períodos de tempo estudados, ou seja testou-se um ajustamento do tipo:

$$\text{prob}(t) = A + B.t$$

obtendo-se os resultados apresentados no quadro 3.2.2.6.

	Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
A	0.494	0.731	0.260	0.824	0.363	0.580	0.631
B	0.018	0.015	0.029	0.017	0.031	0.027	0.031
ρ	0.977	0.939	0.995	0.970	0.999	0.999	0.996

Nota: $\text{prob}(t)$ em percentagem e t em dias.

Quadro 3.2.2.6 - Resultados do ajustamento linear efectuado para a região de Lisboa

Efectuou-se o mesmo estudo para a região da Andaluzia.

Região da Andaluzia

T0	Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
7 dias	1.73	2.60	1.87	3.07	2.73	3.07	3.63
15 dias	2.10	3.83	3.30	4.70	3.97	4.13	4.93
30 dias	5.03	6.20	5.43	6.53	6.00	6.43	7.10
90 dias	12.73	13.10	12.23	13.83	13.40	13.47	14.10

Quadro 3.2.2.7 - Probabilidade de ocorrência de um sismo forte na região da Andaluzia (em %)

	Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
A	0.586	2.011	1.382	2.554	2.012	2.359	3.038
B	0.136	0.125	0.122	0.126	0.127	0.124	0.124
ρ	0.997	0.998	0.998	0.998	1.000	0.999	0.998

Quadro 3.2.2.8 - Resultados do ajustamento linear efectuado para a região da Andaluzia

Dado que o valor do coeficiente de correlação é sempre superior a 0.9, considera-se aceitável o ajustamento linear, tornando assim possível a estimação da probabilidade de se verificar pelo menos um sismo, de magnitude maior ou igual a 5, nas regiões de Lisboa e Andaluzia, durante um período de tempo entre 7 e 90 dias, sabendo-se que se partiu de um cenário correspondente a cada uma das combinações de factores estudados.

A título de exemplo apresentam-se os intervalos de confiança a 95% para a proporção de ocorrências correspondentes aos primeiros conjuntos de *condições iniciais*, para períodos de 7 dias.

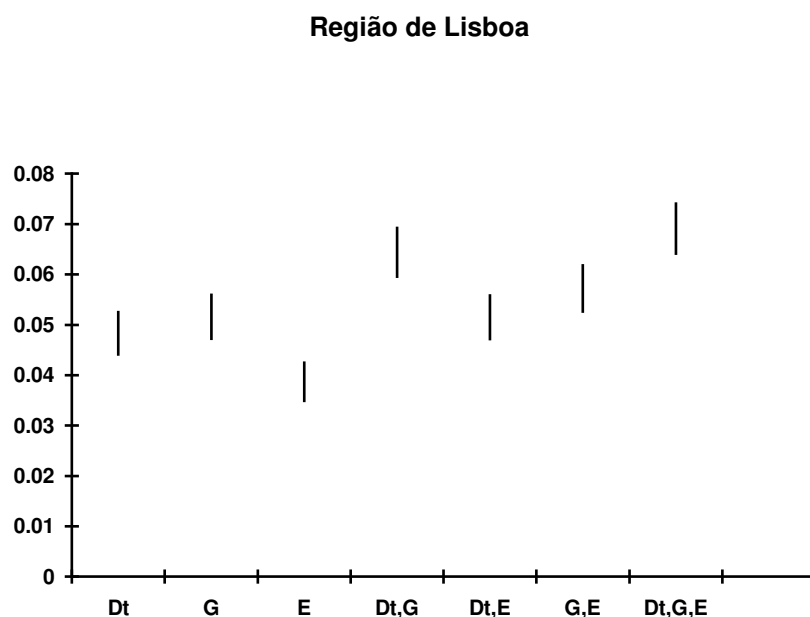


Figura 3.2.2.1 - Intervalo de confiança para a proporção de sismos com magnitude $4 \leq G < 5$

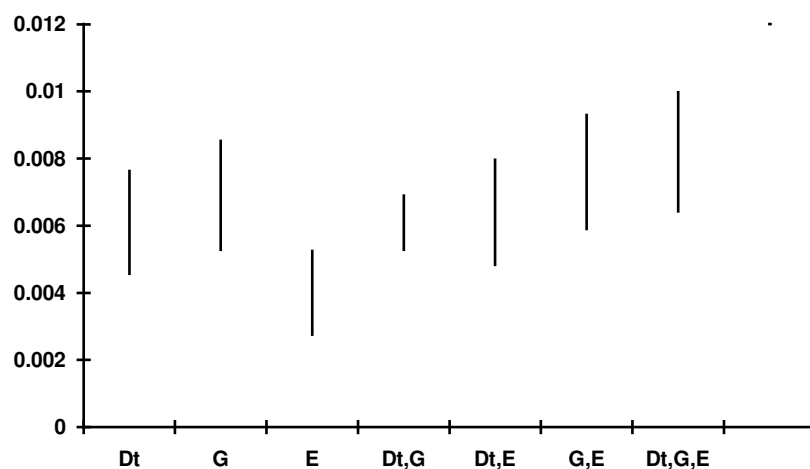


Figura 3.2.2.2 - Intervalo de confiança para a proporção de sismos com magnitude $G \geq 5$

Região da Andaluzia

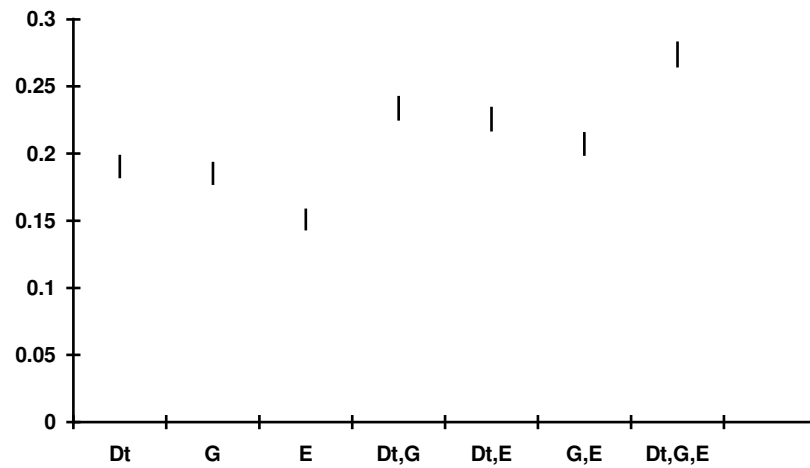


Figura 3.2.2.3 - Intervalo de confiança para a proporção de sismos com magnitude $4 \leq G < 5$

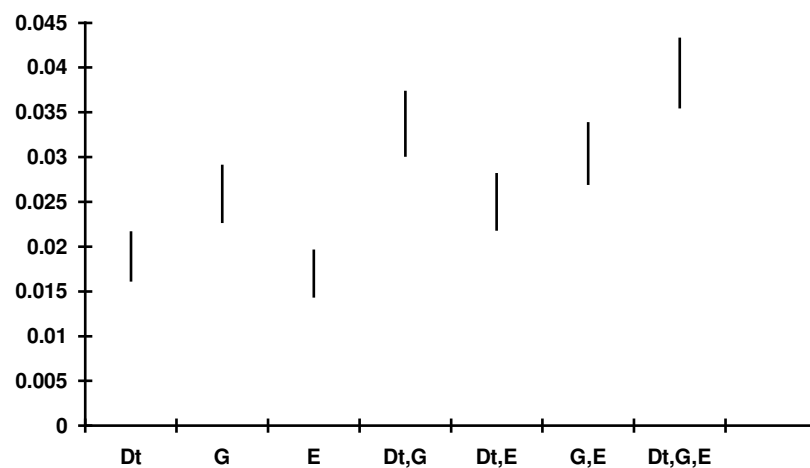


Figura 3.2.2.4 - Intervalo de confiança para a proporção de sismos com magnitude $G \geq 5$

Verifica-se que a diferenciação nos intervalos de confiança (mesmo para períodos de 7 dias) não é notória, apresentando até nalguns casos, sobreposições parciais nos intervalos.

Deve referir-se que, ao analisar-se 7 cenários sísmicos (um número relativamente elevado) não se potencia a diferenciação nas componentes dos *vectores de prioridades*.

3.2.3 - Conclusões

Comparou-se a influência das *condições iniciais* num modelo de simulação tridimensional (Tempo, Grandeza e Espaço) do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica (Costa, 1989). Para se iniciar a simulação do processo de ocorrências sísmicas, a partir do referido modelo é necessário conhecer os valores de D_{t_i-2} , D_{t_i-1} , G_{i-2} , G_{i-1} e E_{i-1} .

Estudaram-se as combinações de factores: Dt; G; E; Dt,G; Dt,E; G,E e Dt,G,E.

O estudo levado a cabo considerou duas regiões: (Lisboa e Andaluzia), quatro períodos de tempo (7, 15, 30 e 90) e dois níveis de magnitude: $4 \leq G < 5$ e $G \geq 5$.

Da análise dos resultados verifica-se que, para ambas as regiões estudadas, à medida que o horizonte temporal aumenta, diminui a diferença nos valores das componentes dos *vectores de prioridades*, **sendo a probabilidade de ocorrência de sismos de magnitude $G \geq 5$ mais sensível às condições iniciais do que a probabilidade de ocorrência de sismos de magnitude entre 4 e 5.**

Em ambas as regiões estudadas verifica-se que são predominantes as seguintes combinações de factores: **Dt, G, E**, significando “que as duas últimas ocorrências tiveram lugar há pouco tempo, com elevada magnitude, tendo-se a última situado na zona em estudo” e **Dt, G**, significando que “as duas últimas ocorrências tiveram lugar há pouco tempo, com elevada magnitude, mas a última não se situou na zona em estudo”.

É ainda notória a influência das combinações de factores: **G, E** (“as duas últimas ocorrências tiveram elevada magnitude e a última situou-se na zona em estudo”), **Dt, E** (“as duas últimas ocorrências tiveram lugar há pouco tempo, tendo-se a última situado na zona em estudo”) e **G** (“as duas últimas ocorrências tiveram elevada magnitude”).

A influência das restantes combinações de factores é pouco notória.

Os resultados obtidos permitem observar uma diferenciação nas componentes dos *vectores de prioridades*, que se vai atenuando com o aumento do horizonte temporal.

Como já se referiu, ao analisar-se 7 cenários sísmicos, não se potencia a diferenciação nas componentes dos *vectores de prioridades*. Com efeito, algumas análises estatísticas clássicas levaram à sobreposição parcial dos vários intervalos de confiança a 95% para a proporção de ocorrências correspondentes aos diferentes cenários. Estes resultados estão na base da geração de

condições iniciais pseudo aleatórias (veja-se 3.3) que permitem antever uma maior diferenciação nas componentes do *vector de prioridades*.

Ressalva-se, no entanto, a relevância da metodologia apresentada quando se pretende comparar **cenários sísmicos reais**.

3.3 - Estudo da influência de *condições iniciais* geradas aleatoriamente

Pretende-se agora estudar a influência das *condições iniciais* de uma forma mais geral do que a efectuada em 3.2. Em vez de se utilizarem *condições iniciais* com valores arbitrados utilizam-se *condições iniciais* cujos valores são gerados de forma aleatória, dentro de certos intervalos.

O facto de escolhas particulares de *condições iniciais* poderem influenciar os resultados é eliminado se o número de *condições iniciais* geradas aleatoriamente for elevado. Note-se ainda que, desta forma, se assegura a não repetição de valores nas *condições iniciais*, dada a forma do processo de geração aleatória.

No caso de *condições iniciais* com valores arbitrados se, nas simulações a efectuar, se utilizasse um número elevado de valores de *condições iniciais*, não seria possível assegurar a não repetição de valores. No entanto, se se pretender comparar cenários sísmicos reais o processo de comparação adequado é, obviamente, o de *condições iniciais* com valores fixos.

A medida de performance utilizada é agora \bar{x} , já que se pretende saber qual, ou quais, os factores que, “em média”, conduzem a um maior número de sismos de forte magnitude.

Tal como anteriormente, estudaram-se todas as possibilidades de combinações de factores elementares (isoladamente, dois a dois e os três) obtendo-se um total de sete possibilidades de factores:

G
E
Dt, G
Dt, E
G, E
Dt, G, E

À semelhança do que foi feito em 3.2, seleccionam-se duas regiões sísmicas a estudar: a região de Lisboa (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 1 e 7) e a região da Andaluzia (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 2 e 3).

Estudaram-se 4 **horizontes temporais** - **T0**: 7 dias, 15 dias, 30 dias e 90 dias e consideraram-se apenas os sismos de magnitude Richter superiores ou iguais a 4.

Estudaram-se os sismos de média e forte magnitude, respectivamente, $4 \leq G < 5$ e $G > 5$.

Admita-se que se pretendia comparar **k** cenários sísmicos, e que se conheciam os **k** valores correspondentes de $\bar{s} : \bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_k$.

À semelhança do que foi feito no estudo anterior, utilizou-se a metodologia **AHP (Analytic Hierarchy Process)**, uma vez que esta metodologia permite determinar a influência global de cada cenário, utilizando comparações de pares de cenários sísmicos.

A comparação de cenários sísmicos dois a dois pode ser feita facilmente, dividindo os dois valores de \bar{s} obtidos.

Para se utilizar a metodologia AHP, tem de se construir a **matriz de julgamentos** (veja-se 2.1.3) para os **k** cenários sísmicos envolvidos.

Recorde-se que nesta matriz cada elemento $a(i, j)$ tem o seguinte significado: se $a(i, j) = \alpha$, então o cenário correspondente à linha i é α vezes "mais importante", ou melhor, "mais preocupante", do que o cenário correspondente à coluna j .

No caso de comparação de k cenários, $\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_k$, cada elemento da matriz é determinado da seguinte forma:

$$a(i, j) = \bar{s}_i / \bar{s}_j$$

Os elementos da diagonal valem 1, já que cada cenário vale tanto quanto ele próprio. Os restantes elementos da matriz são recíprocos, ou seja, $a(i, j) = 1 / a(j, i)$, $i \neq j$.

Uma vez formada a *matriz de julgamentos* é possível calcular o **vector de prioridades** correspondente, bastando para tal determinar o vector próprio principal da *matriz de julgamentos* e normaliza-lo.

O *vector de prioridades* indica a "importância" percentual de cada um dos cenários.

No caso concreto em que se pretende comparar a influência de sete cenários sísmicos, correspondentes às combinações de factores:

Dt
G
E
Dt, G
Dt, E
G, E
Dt, G, E

no processo de ocorrências sísmicas da Península Ibérica, é necessário construir uma matriz de 7×7 , e efectuar 21 comparações, já que, numa *matriz de julgamentos* é necessário efectuar $m \cdot (m - 1) / 2$ comparações, sendo **m** o número de características a comparar.

Para cada combinação de factores efectuaram-se **n** simulações do processo de ocorrências sísmicas, tendo-se determinado o número médio de ocorrências de magnitude superior ou igual a um valor previamente fixado - G_0 , que ocorreram na região em estudo, durante o período de tempo T_0 . Designem-se esses valores por:

\bar{s}_A - para a *condição inicial* relativa a Dt
 \bar{s}_B - para a *condição inicial* relativa a G
 \bar{s}_C - para a *condição inicial* relativa a E
 \bar{s}_D - para a *condição inicial* relativa a Dt, G
 \bar{s}_E - para a *condição inicial* relativa a Dt, E
 \bar{s}_F - para a *condição inicial* relativa a G, E
 \bar{s}_G - para a *condição inicial* relativa a Dt, G, E

A *matriz de julgamentos* é então construída da seguinte forma:

	Dt	G	E	Dt,G	Dt,E	G,E	Dt,G,E
Dt	1	\bar{s}_A / \bar{s}_B	\bar{s}_A / \bar{s}_C	\bar{s}_A / \bar{s}_D	\bar{s}_A / \bar{s}_E	\bar{s}_A / \bar{s}_F	\bar{s}_A / \bar{s}_G
G	\bar{s}_B / \bar{s}_A	1	\bar{s}_B / \bar{s}_C	\bar{s}_B / \bar{s}_D	\bar{s}_B / \bar{s}_E	\bar{s}_B / \bar{s}_F	\bar{s}_B / \bar{s}_G
E	\bar{s}_C / \bar{s}_A	\bar{s}_C / \bar{s}_B	1	\bar{s}_C / \bar{s}_D	\bar{s}_C / \bar{s}_E	\bar{s}_C / \bar{s}_F	\bar{s}_C / \bar{s}_G
Dt,G	\bar{s}_D / \bar{s}_A	\bar{s}_D / \bar{s}_B	\bar{s}_D / \bar{s}_C	1	\bar{s}_D / \bar{s}_E	\bar{s}_D / \bar{s}_F	\bar{s}_D / \bar{s}_G
Dt,E	\bar{s}_E / \bar{s}_A	\bar{s}_E / \bar{s}_B	\bar{s}_E / \bar{s}_C	\bar{s}_E / \bar{s}_D	1	\bar{s}_E / \bar{s}_F	\bar{s}_E / \bar{s}_G
G,E	\bar{s}_F / \bar{s}_A	\bar{s}_F / \bar{s}_B	\bar{s}_F / \bar{s}_C	\bar{s}_F / \bar{s}_D	\bar{s}_F / \bar{s}_E	1	\bar{s}_F / \bar{s}_G
Dt,G,E	\bar{s}_G / \bar{s}_A	\bar{s}_G / \bar{s}_B	\bar{s}_G / \bar{s}_C	\bar{s}_G / \bar{s}_D	\bar{s}_G / \bar{s}_E	\bar{s}_G / \bar{s}_F	1

Uma vez formada a *matriz de julgamentos* determina-se o *vector de prioridades* correspondente, obtendo-se

$$[p_{Dt} \ p_G \ p_E \ p_{Dt,G} \ p_{Dt,E} \ p_{G,E} \ p_{Dt,G,E}]^T.$$

A partir do *vector de prioridades* é possível saber, de entre os cenários sísmicos comparados, qual a combinação de factores mais preocupante, bastando para tal verificar qual a componente com maior valor.

3.3.1 - Experiências efectuadas

Torna-se agora necessário definir como é que uma *condição inicial* pode exprimir influência de um factor ou combinação de factores.

Admitiu-se que:

- se se pretender estudar a influência do factor D_t , a *condição inicial* correspondente a este factor deverá possuir valores reduzidos de D_{t-2} e D_{t-1} .

Consideraram-se “valores reduzidos D_{t-2} e D_{t-1} ” valores inferiores ao percentil 40% da distribuição empírica de D_t .

- para exprimir influência de G , as *condições iniciais* devem ser geradas de acordo com o seguinte: G_{i-2} e G_{i-1} devem ter valores elevados, ou seja, devem ter valores superiores ao percentil 60 % da distribuição empírica de G .

- quando se pretende estudar o factor E , E_{i-1} deve ter o valor de uma das *zonas sísmicas* da região em estudo.

Quando não se pretende exprimir influência dos factores DT e G , os seus valores nas *condições iniciais* devem ser gerados aleatoriamente entre os percentis 40 e 60 % das correspondentes distribuições empíricas, pretendendo-se desta forma que os seus valores sejam “o mais normais possível”.

De referir que em 3.2 se admitiu que quando um factor não é objecto de estudo, o seu valor, nas *condições iniciais*, se devia situar próximo do valor médio da respectiva distribuição empírica, excepto obviamente, para o factor E .

No caso de não se pretender exprimir influência do factor Espaço, E_{i-1} deve ter um valor gerado aleatoriamente no conjunto dos números das *zonas sísmicas* que constituem a Península Ibérica, mas não pertencendo ao conjunto constituído pelos números das *zonas sísmicas* que constituem a região em estudo.

No caso de se pretender exprimir influência do factor Espaço, E_{i-1} deve ter um valor gerado aleatoriamente no conjunto dos números das *zonas sísmicas* que constituem a região em estudo.

Comb. factores	<i>Condições iniciais</i>				
	Dt		G		E
	i-2	i-1	i-2	i-1	i-1
Dt	inferior a QDt ₄₀	inferior a QDt ₄₀	entre QG ₄₀ e QG ₆₀	entre QG ₄₀ e QG ₆₀	fora da zona em estudo
G	entre QDt ₄₀ e QDt ₆₀	entre QDt ₄₀ e QDt ₆₀	superior a QG ₆₀	superior a QG ₆₀	fora da zona em estudo
E	entre QDt ₄₀ e QDt ₆₀	entre QDt ₄₀ e QDt ₆₀	entre QG ₄₀ e QG ₆₀	entre QG ₄₀ e QG ₆₀	na zona em estudo
Dt, G	inferior a QDt ₄₀	inferior a QDt ₄₀	superior a QG ₆₀	superior a QG ₆₀	fora da zona em estudo
Dt, E	inferior a QDt ₄₀	inferior a QDt ₄₀	entre QG ₄₀ e QG ₆₀	entre QG ₄₀ e QG ₆₀	na zona em estudo
G, E	entre QDt ₄₀ e QDt ₆₀	entre QDt ₄₀ e QDt ₆₀	superior a QG ₆₀	superior a QG ₆₀	na zona em estudo
Dt, G, E	inferior a QDt ₄₀	inferior a QDt ₄₀	superior a QG ₆₀	superior a QG ₆₀	na zona em estudo

Quadro 3.3.1.1 - Representação esquemática das *condições iniciais* comparadas

Legenda:

QDt₄₀ - percentil 40% da distribuição empírica de Dt (0.0014159 ano = 12h 24mn 11.8seg.)
 QDt₆₀ - percentil 60% da distribuição empírica de Dt (0.0037416 ano = 1dia 8h 46mn 35.1seg.)
 QG₄₀ - percentil 40% da distribuição empírica de G (3.18 magnitude Richter)
 QG₆₀ - percentil 60% da distribuição empírica de G (3.5 magnitude Richter)

Testaram-se quatro períodos de tempo: 7, 15, 30 e 90 dias. Consideraram-se, numa primeira análise, os sismos com $G \geq 4$, tendo-se contabilizado o valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% do número médio de ocorrências.

O intervalo de confiança foi determinado com base na distribuição Normal, visto que o elevado número de simulações efectuado (10000) permite a aproximação à distribuição Normal (Teorema do Limite Central).

Posteriormente, efectuou-se uma análise mais fina, tendo-se separado os abalos sísmicos em sismos de média magnitude ($4 \leq G < 5$) e sismos fortes $G > 5$. Neste caso, para não tornar a apresentação dos resultados demasiado monótona, determinou-se apenas o valor médio do número de ocorrências.

Em todos os casos, determinaram-se os correspondentes *vectores de prioridades*.

Nos quadros 3.3.1.2 a 3.1.5 “d.p.” designa desvio padrão. As figuras 3.3.1.1 a 3.3.1.8 apresentam os Intervalos de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4,

Resultados para sismos com $G \geq 4$

Comb. de factores	Lisboa			Andaluzia		
	\bar{s}	d.p. s	I.C. a 95% para \bar{s}	\bar{s}	d.p. s	I.C. a 95% para \bar{s}
Dt	0.0583	0.2343	0.0537 - 0.0629	0.1782	0.3827	0.1707 - 0.1857
G	0.0093	0.0960	0.0074 - 0.0112	0.1391	0.3461	0.1323 - 0.1459
E	0.0475	0.2127	0.0433 - 0.0517	0.1356	0.3484	0.1288 - 0.1424
Dt, G	0.0000	-	-	0.2175	0.4125	0.2094 - 0.2256
Dt, E	0.0749	0.2632	0.0697 - 0.0801	0.2817	0.5591	0.2707 - 0.2927
G, E	0.1327	0.3393	0.1261 - 0.1393	0.2670	0.6160	0.2549 - 0.2791
Dt, G, E	0.0664	0.2490	0.0615 - 0.0713	0.4183	0.6823	0.4049 - 0.4317

Quadro 3.3.1.2 - Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% para a média de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4, durante um período de tempo de 7 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia

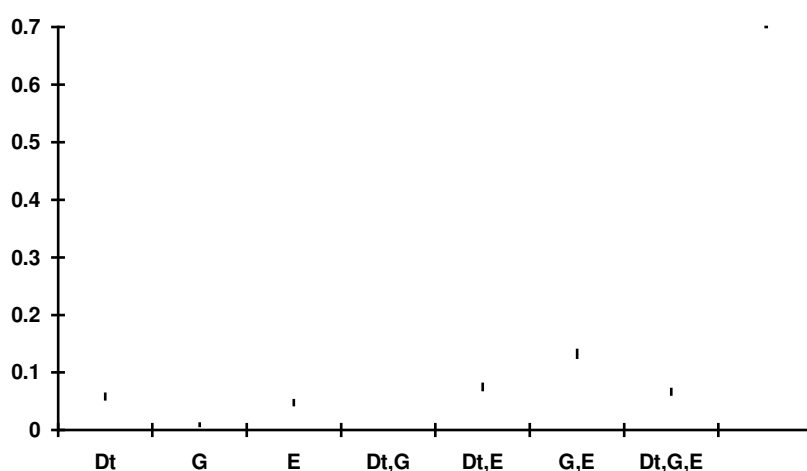


Figura 3.3.1.1 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, durante um período de tempo de 7 dias

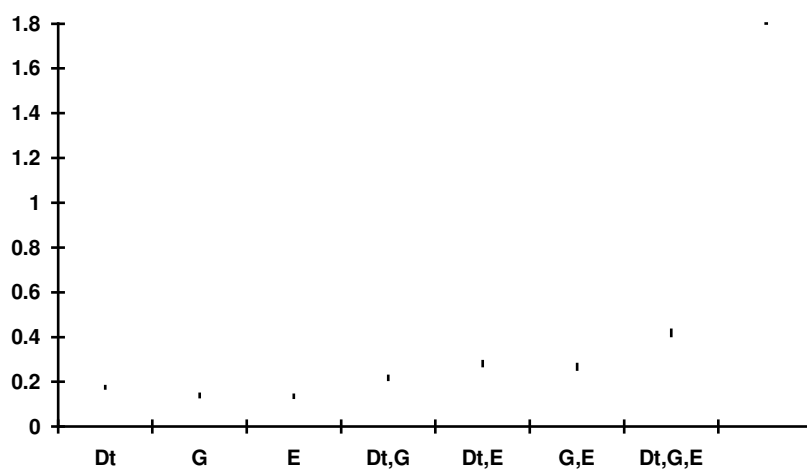


Figura 3.3.1.2 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Andaluzia, durante um período de tempo de 7 dias

Comb. de factores	Lisboa			Andaluzia		
	\bar{s}	d.p. s	I.C. a 95% para \bar{s}	\bar{s}	d.p. s	I.C. a 95% para \bar{s}
Dt	0.1418	0.3488	0.1350 - 0.1486	0.2853	0.4822	0.2758 - 0.2948
G	0.0167	0.1281	0.0142 - 0.0192	0.3648	0.6865	0.3513 - 0.3783
E	0.0775	0.2678	0.0723 - 0.0827	0.4162	0.8683	0.3992 - 0.4332
Dt, G	0.0000	-	-	0.3059	0.5199	0.2957 - 0.3161
Dt, E	0.0990	0.2987	0.0931 - 0.1049	0.6653	0.9638	0.6464 - 0.6842
G, E	0.2433	0.4291	0.2349 - 0.2517	0.3827	0.7642	0.3677 - 0.3977
Dt, G, E	0.1244	0.4086	0.1164 - 0.1324	0.7542	1.2183	0.7517 - 0.7567

Quadro 3.3.1.3 - Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% para a média de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4, durante um período de tempo de 15 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia

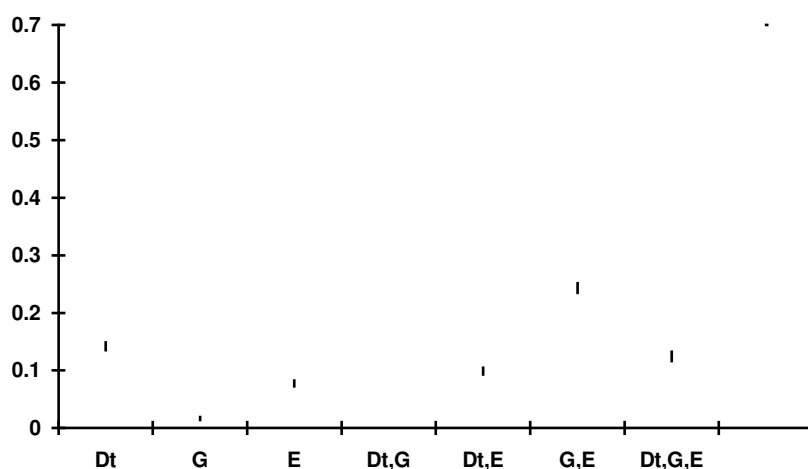


Figura 3.3.1.3 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, durante um período de tempo de 15 dias

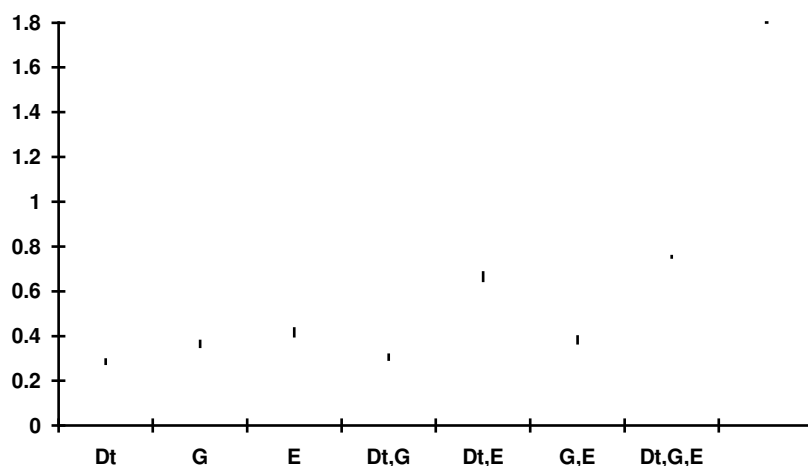


Figura 3.3.1.4 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Andaluzia, durante um período de tempo de 15 dias

Comb. de factores	Lisboa			Andaluzia		
	\bar{s}	d.p. s	I.C. a 95% para \bar{s}	\bar{s}	d.p. s	I.C. a 95% para \bar{s}
Dt	0.1607	0.3673	0.1535 - 0.1679	0.4702	0.6566	0.4573 - 0.4831
G	0.1583	0.3650	0.1511 - 0.1655	0.5316	0.7499	0.5169 - 0.5463
E	0.1140	0.3186	0.1079 - 0.1203	0.6165	1.1737	0.5935 - 0.6395
Dt, G	0.0441	0.2053	0.0401 - 0.0481	0.5077	0.7225	0.4935 - 0.5219
Dt, E	0.2628	0.5310	0.2524 - 0.2732	0.8777	1.0556	0.8570 - 0.8984
G, E	0.3176	0.4717	0.3084 - 0.3268	0.6274	0.8509	0.6107 - 0.6441
Dt, G, E	0.1828	0.4554	0.1739 - 0.1917	0.8464	1.2198	0.8225 - 0.8703

Quadro 3.3.1.4 - Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% para a média de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4, durante um período de tempo de 30 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia

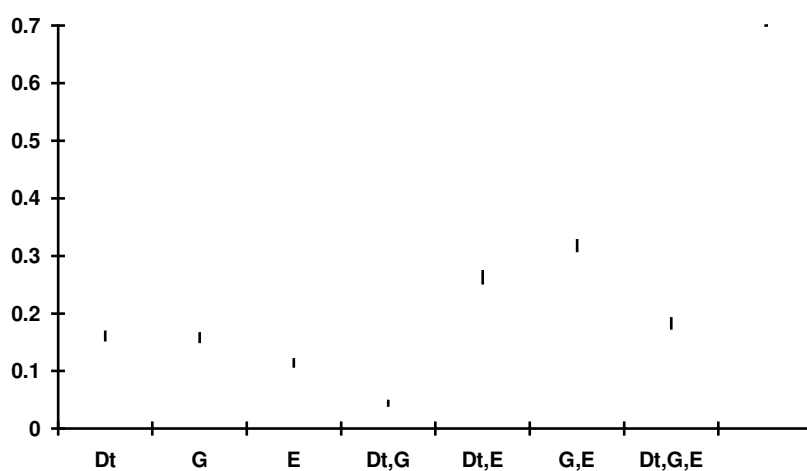


Figura 3.3.1.5 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, durante um período de tempo de 30 dias

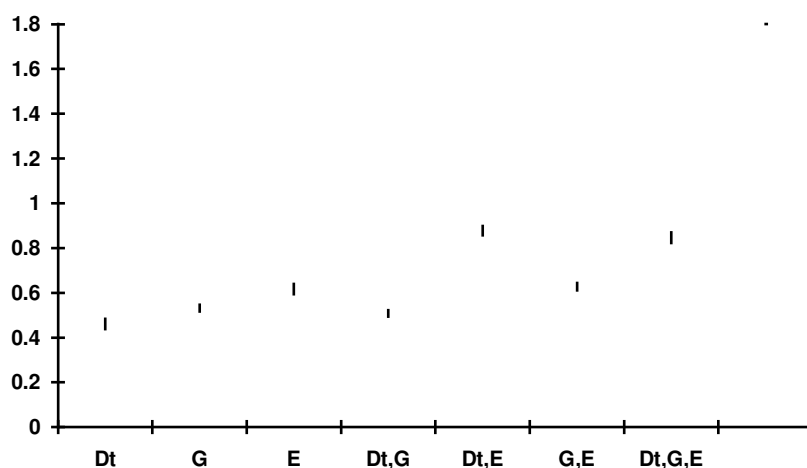


Figura 3.3.1.6 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Andaluzia, durante um período de tempo de 30 dias

Comb. de factores	Lisboa			Andaluzia		
	\bar{s}	d.p. s	I.C. a 95% para \bar{s}	\bar{s}	d.p. s	I.C. a 95% para \bar{s}
Dt	0.2651	0.4572	0.2561 - 0.2741	1.2475	1.3140	1.2217 - 1.2733
G	0.3441	0.5498	0.3333 - 0.3549	1.3142	1.0571	1.1135 - 1.1549
E	0.4361	0.7312	0.4218 - 0.4504	1.6134	1.8058	1.5780 - 1.6488
Dt, G	0.2389	0.5194	0.2287 - 0.2491	1.2772	1.2604	1.2525 - 1.3019
Dt, E	0.5743	0.9428	0.5558 - 0.5928	1.8706	1.3126	1.8449 - 1.8963
G, E	0.5853	0.7882	0.5699 - 0.6007	1.6341	1.4299	1.6061 - 1.6621
Dt, G, E	0.5484	0.9258	0.5303 - 0.5665	1.6236	1.5759	1.5927 - 1.6545

Quadro 3.3.1.5 - Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% para a média de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4, durante um período de tempo de 90 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia

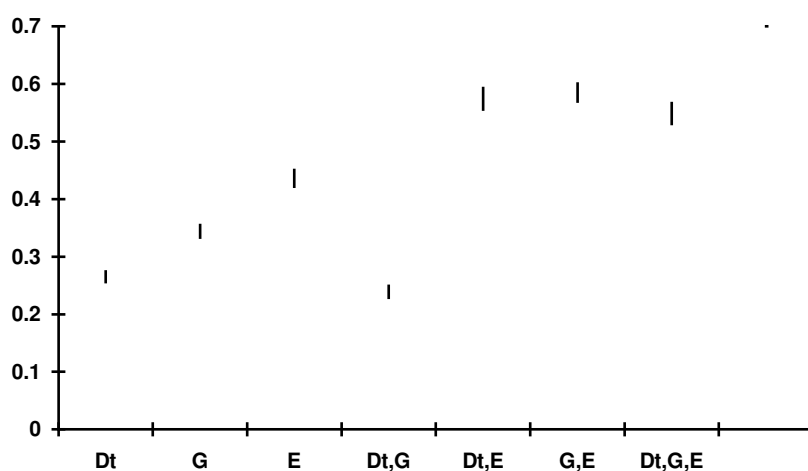


Figura 3.3.1.7 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Lisboa, durante um período de tempo de 90 dias

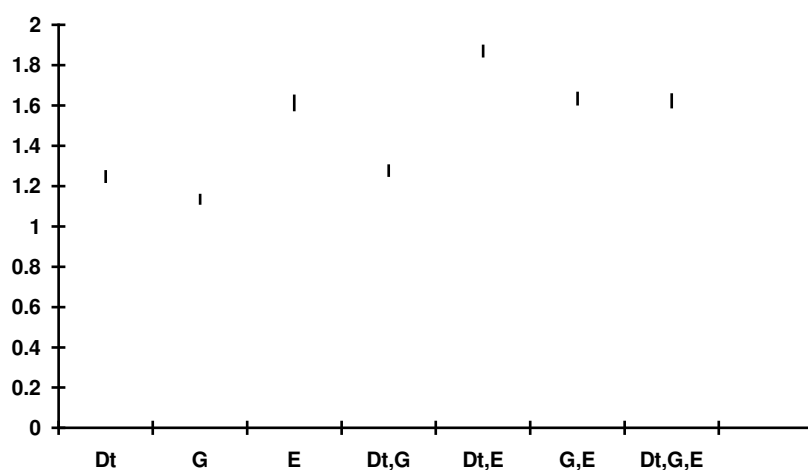


Figura 3.3.1.8 - Intervalo de confiança a 95% para o número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4, na região de Andaluzia, durante um período de tempo de 90 dias

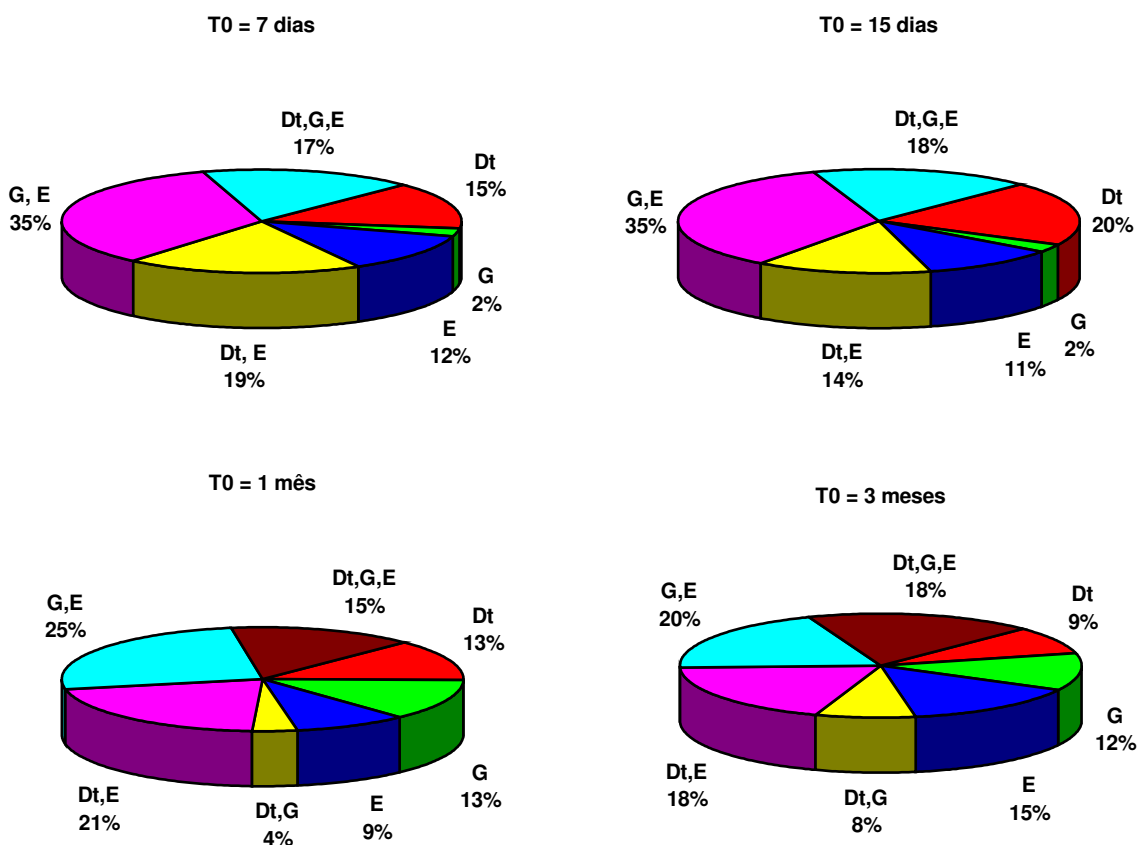


Figura 3.3.1.9 - *Vectores de prioridades* para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $G \geq 4$

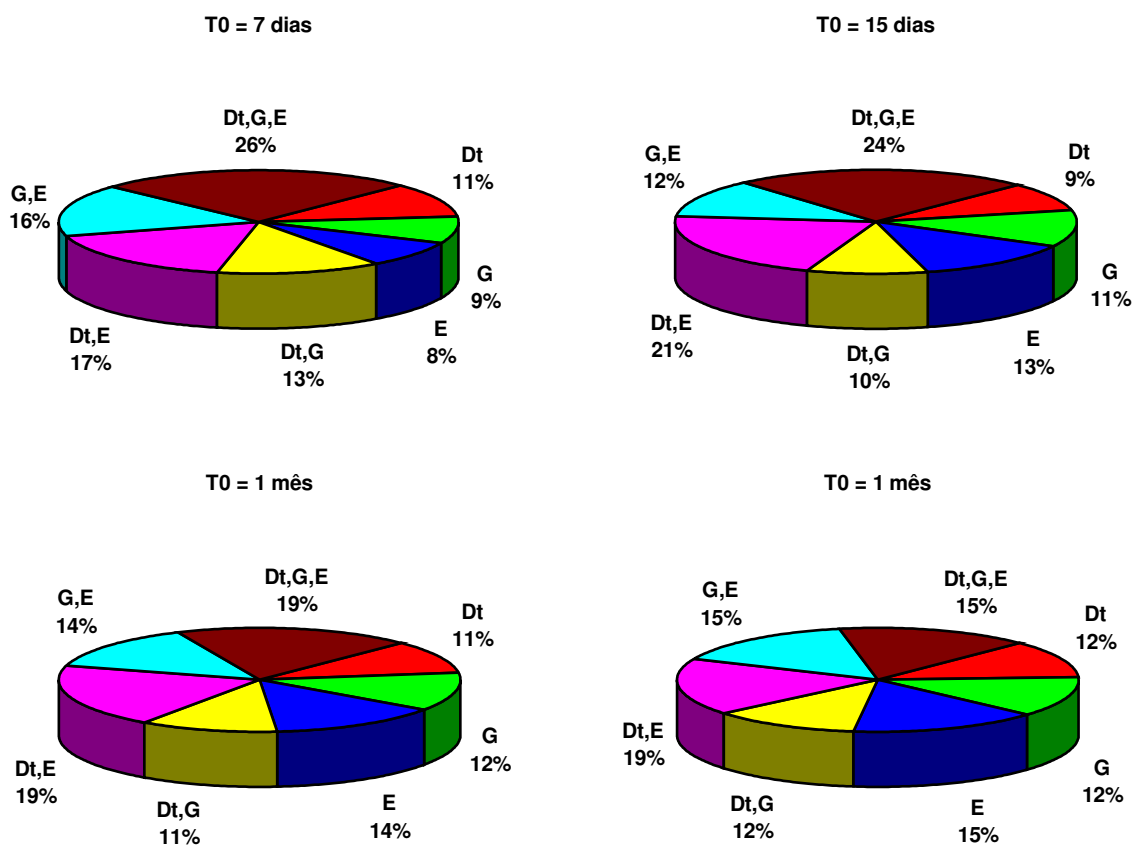


Figura 3.3.1.10 - *Vectores de prioridades* para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $G \geq 4$

Resultados para sismos de média e forte magnitude

Comb. de factores	Lisboa		Andaluzia	
	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$
Dt	0.0583	0.0000	0.1423	0.0359
G	0.0093	0.0000	0.1050	0.0341
E	0.0475	0.0000	0.1346	0.0010
Dt, G	0.0000	0.0000	0.1906	0.0269
Dt, E	0.0000	0.0000	0.2710	0.0107
G, E	0.1327	0.0000	0.1783	0.0887
Dt, G, E	0.0664	0.0000	0.3915	0.0268

Quadro 3.3.1.6 - Valor médio do número de ocorrências de média e forte magnitude, durante um período de tempo de 7 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia

Comb. de factores	Lisboa		Andaluzia	
	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$
Dt	0.1418	0.0000	0.2493	0.0360
G	0.0167	0.0000	0.2902	0.0746
E	0.0774	0.0001	0.3843	0.0319
Dt, G	0.0000	0.0000	0.2500	0.0559
Dt, E	0.0990	0.0000	0.6546	0.0107
G, E	0.1759	0.0674	0.3170	0.0657
Dt, G, E	0.0954	0.0290	0.7274	0.0268

Quadro 3.3.1.7 - Valor médio do número de ocorrências de média e forte magnitude, durante um período de tempo de 15 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia

Comb. de factores	Lisboa		Andaluzia	
	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$
Dt	0.1607	0.0000	0.4342	0.0360
G	0.1583	0.0000	0.4242	0.1074
E	0.1139	0.0001	0.5646	0.0319
Dt, G	0.0441	0.0000	0.4484	0.0593
Dt, E	0.2539	0.0089	0.8669	0.0108
G, E	0.2462	0.0714	0.5319	0.0955
Dt, G, E	0.1538	0.0290	0.7914	0.0550

Quadro 3.3.1.8 - Valor médio do número de ocorrências de média e forte magnitude, durante um período de tempo de 30 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia

Comb. de factores	Lisboa		Andaluzia	
	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$
Dt	0.2651	0.0000	1.0848	0.1627
G	0.2768	0.0673	1.3142	0.1411
E	0.4344	0.0017	1.5446	0.0688
Dt, G	0.2282	0.0107	1.1839	0.0933
Dt, E	0.5653	0.0090	1.7441	0.1265
G, E	0.5140	0.0713	1.4858	0.1483
Dt, G, E	0.5073	0.0411	1.4977	0.1259

Quadro 3.3.1.9 - Valor médio do número de ocorrências de média e forte magnitude, durante um período de tempo de 90 dias, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia

T0	G	Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
7 dias	$4 \leq G < 5$	0.1856	0.0296	0.1512	-	-	0.4223	0.2113
	$G \geq 5$	-	-	-	-	-	-	-
15 dias	$4 \leq G < 5$	0.2339	0.0275	0.1277	-	0.1633	0.2902	0.1574
	$G \geq 5$	-	-	0.0010	-	-	0.6987	0.3003
30 dias	$4 \leq G < 5$	0.1421	0.1400	0.1007	0.0390	0.2245	0.2177	0.1360
	$G \geq 5$	-	-	0.0009	-	0.0813	0.6527	0.2650
90 dias	$4 \leq G < 5$	0.0950	0.0992	0.1556	0.0818	0.2025	0.1842	0.1818
	$G \geq 5$	-	0.3347	0.0085	0.0532	0.0448	0.3545	0.2044

Quadro 3.3.1.10 - *Vectores de prioridades* para a Região de Lisboa

T0	G	Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
7 dias	$4 \leq G < 5$	0.1007	0.0743	0.0952	0.1349	0.1917	0.1262	0.2770
	$G \geq 5$	0.1602	0.1522	0.0045	0.1200	0.0477	0.3958	0.1196
15 dias	$4 \leq G < 5$	0.0868	0.1010	0.1338	0.0870	0.2279	0.1103	0.2532
	$G \geq 5$	0.1194	0.2473	0.1058	0.1853	0.0355	0.2178	0.0889
30 dias	$4 \leq G < 5$	0.1069	0.1044	0.1390	0.1104	0.2134	0.1310	0.1948
	$G \geq 5$	0.1877	0.1628	0.0794	0.1077	0.1460	0.1711	0.1453
90 dias	$4 \leq G < 5$	0.1101	0.1334	0.1567	0.1201	0.1770	0.1508	0.1520
	$G \geq 5$	0.1877	0.1628	0.0794	0.1077	0.1460	0.1711	0.1453

Quadro 3.3.1.11 - *Vectores de prioridades* para a Região da Andaluzia

As figuras 3.3.1.11 a 3.3.1.14 contêm a mesma informação do que estes dois últimos quadros, mas utilizou-se outro tipo de representação, a fim de facilitar a leitura.

Região de Lisboa

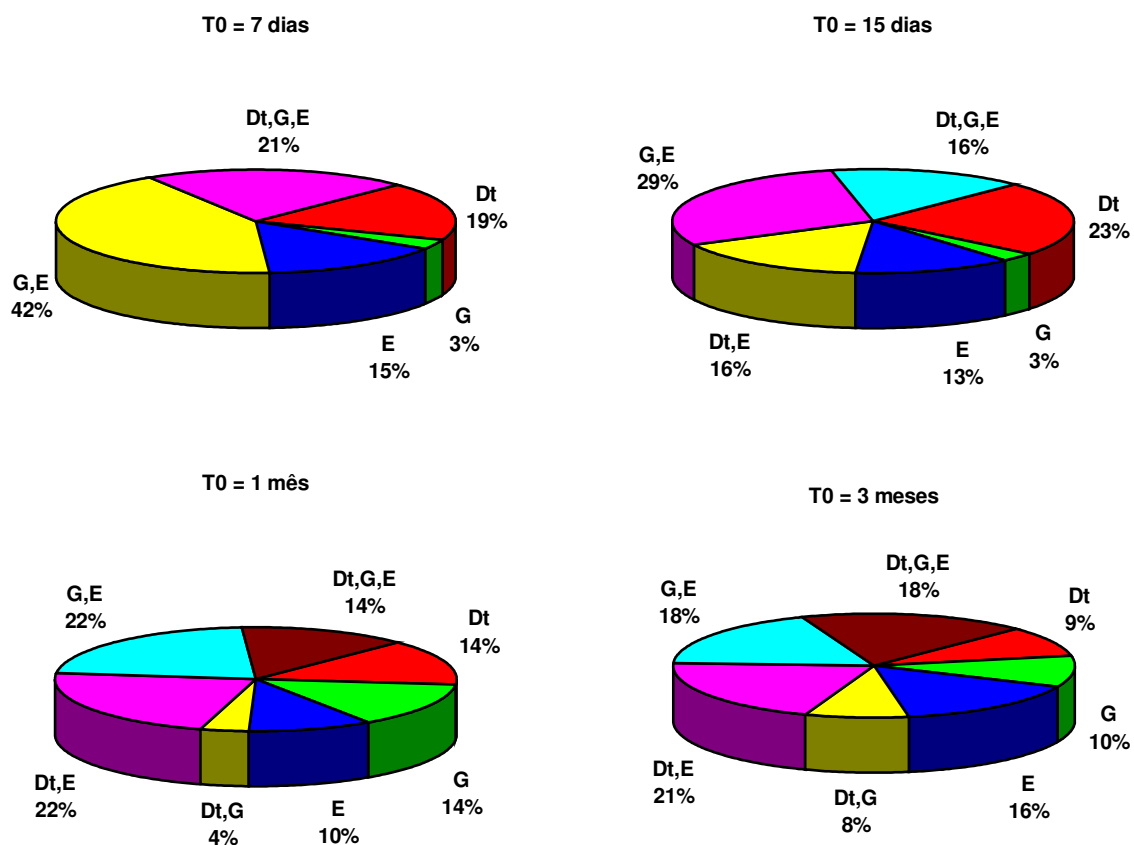


Figura 3.3.1.11 - Vectors de prioridades para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $4 \leq G < 5$

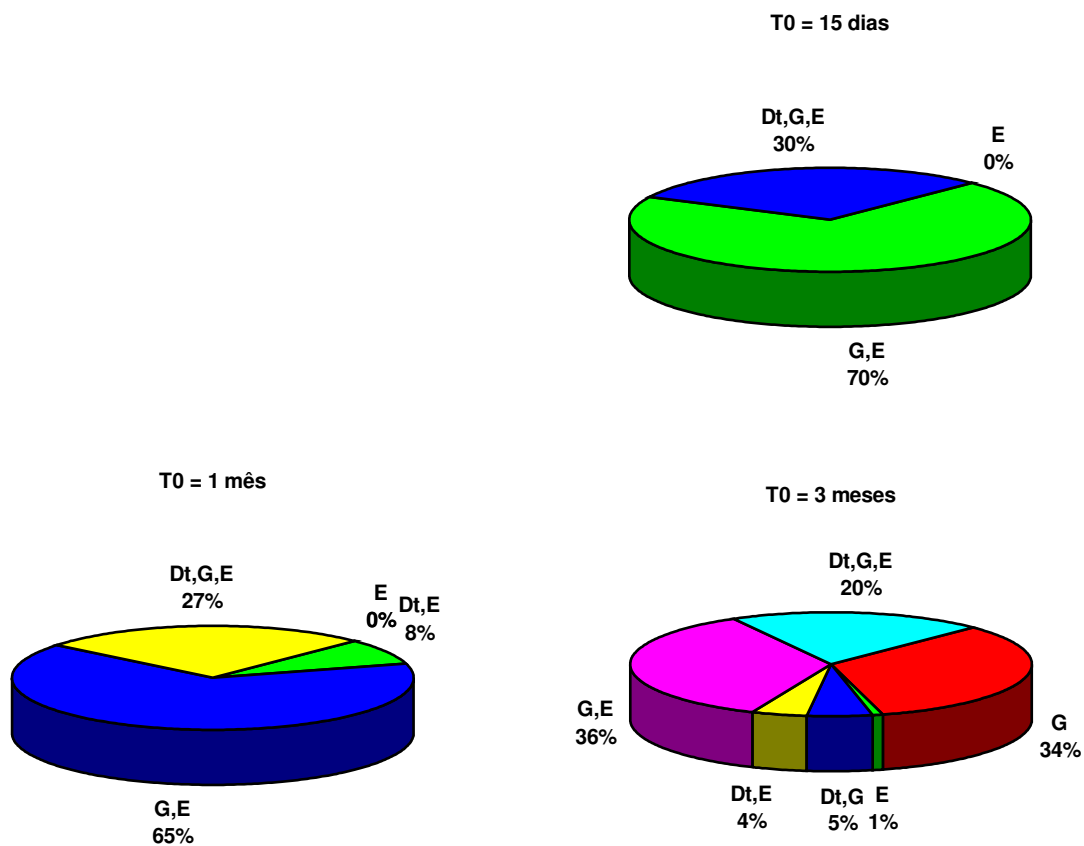


Figura 3.3.1.12 - Vectors de prioridades para a Região de Lisboa, para sismos de magnitude $G \geq 5$

Região da Andaluzia

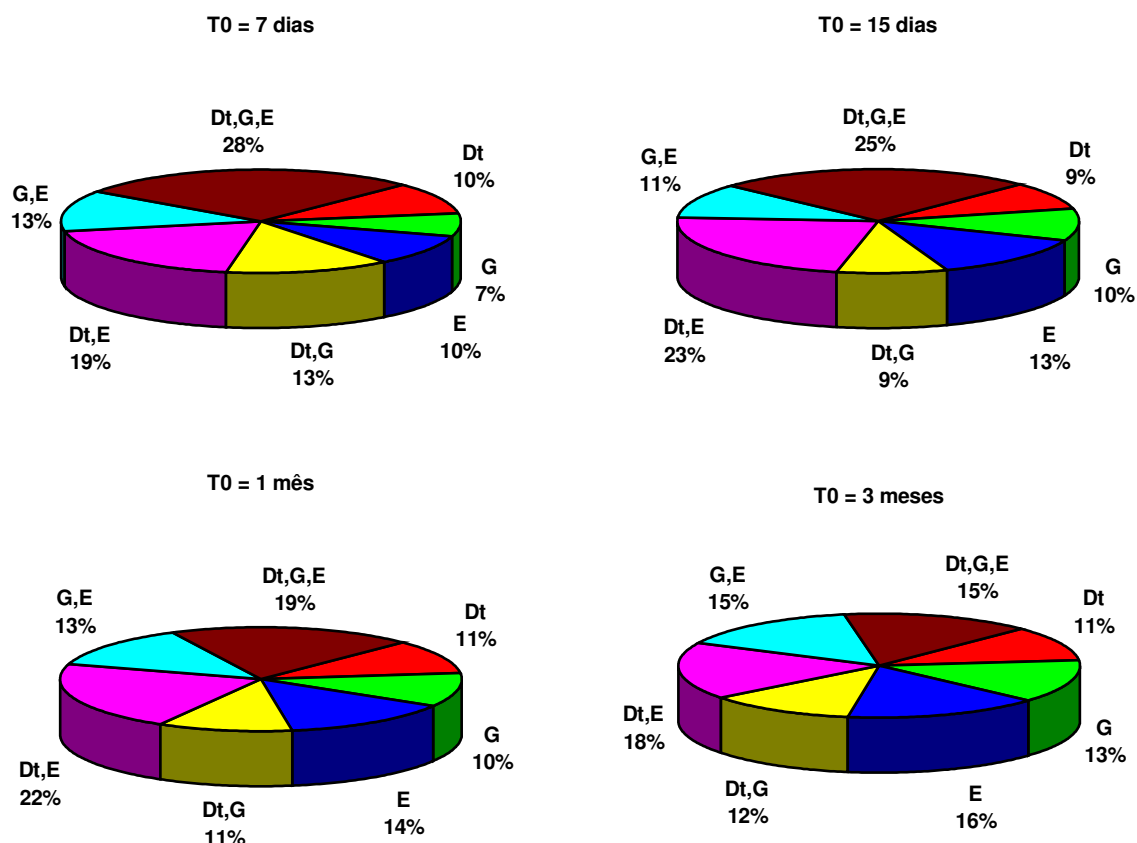


Figura 3.3.1.13 - Vectors de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $4 \leq G < 5$

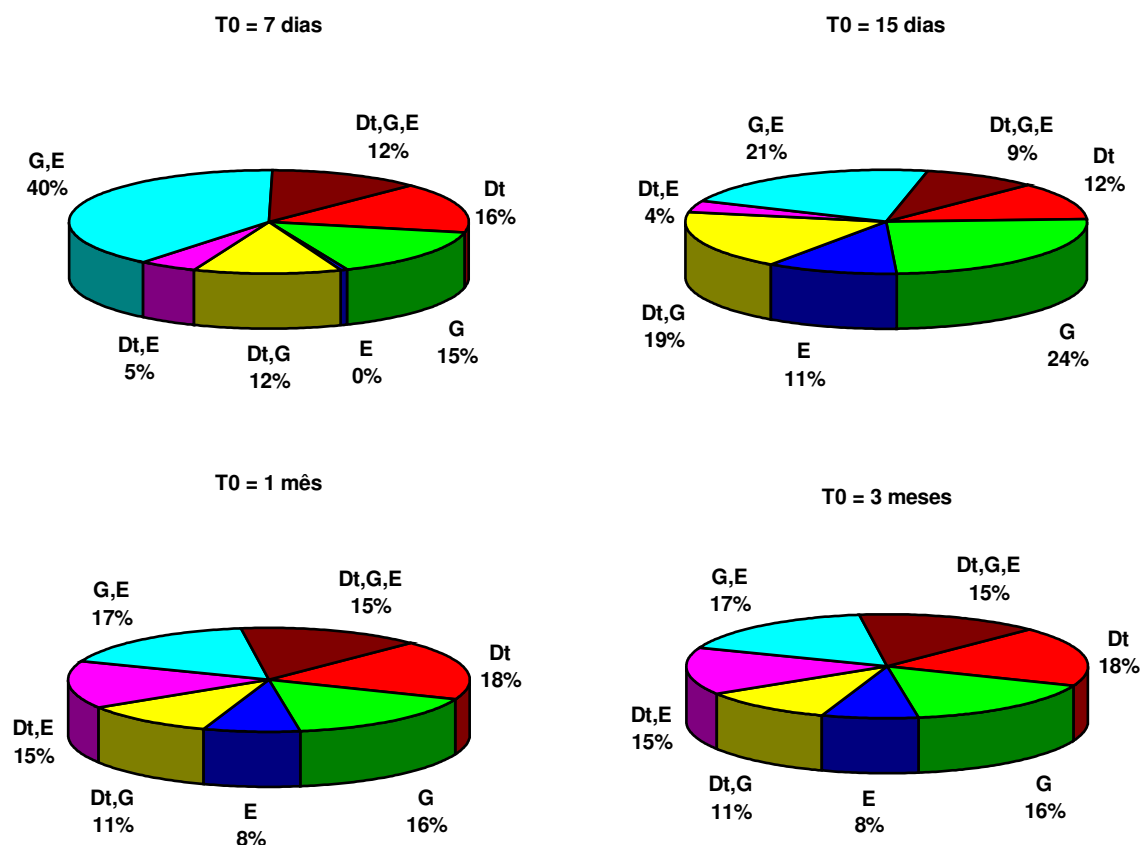


Figura 3.3.1.14 - Vectors de prioridades para a Região da Andaluzia, para sismos de magnitude $G \geq 5$

3.3.2 - Análise de resultados

Para se clarificar o padrão de influência das *condições iniciais*, definiram-se 3 níveis para os valores das componentes dos *vectores de prioridades* - **p**

- $p < 10\%$
- $10\% \leq p < 20\%$
- $p \geq 20\%$

Magnitude	p	T0 = 7 dias	T0 = 15 dias	T0 = 30 dias	T0 = 90 dias
$4 \leq G < 5$	$p < 10$	G	G	Dt, G	Dt Dt, G
	$10 \leq p < 20$	DT E	E Dt, E Dt, G, E	Dt G E Dt, G, E	G E G, E Dt, G, E
	$p \geq 20$	G, E Dt, G, E	G, E Dt	G, E Dt, E	Dt, E
$G \geq 5$	$p < 10$	-	E	E Dt, E	Dt, G E DT, E
	$10 \leq p < 20$	-	-	-	Dt, G, E G, E
	$p \geq 20$	-	Dt, G, E G, E	Dt, G, E G, E	G G, E Dt, G, E
$G \geq 4$	$p < 10$	G Dt, E	G	Dt, G E	DT Dt, G
	$10 \leq p < 20$	Dt E Dt, G, E	E Dt, E Dt, G, E	Dt G Dt, G, E	G E Dt, E Dt, G, E
	$p \geq 20$	G, E	G, E Dt	G, E Dt, E	G, E

Quadro 3.3.2.1 - Representação esquemática das componentes dos *vectores de prioridades* para a Região de Lisboa

e verificou-se, quais as combinações de factores cujas componentes dos *vectores de prioridades* se situavam em cada nível. Os resultados encontram-se nos quadros 3.3.2.1 e 3.3.2.2.

Magnitude	p	T0 = 7 dias	T0 = 15 dias	T0 = 30 dias	T0 = 90 dias
$4 \leq G < 5$	$p < 10$	G	DT Dt, G		
	$10 \leq p < 20$	Dt E Dt, G Dt, E G, E	G E G, E	Dt G E Dt, G G, E Dt, G, E	Dt G E Dt, G Dt, E G, E Dt, G, E
	$p \geq 20$	Dt, G, E	Dt, E Dt, G, E	Dt, E	
$G \geq 5$	$p < 10$	E Dt, E	Dt, E Dt, G, E	E	E
	$10 \leq p < 20$	Dt G Dt, G Dt, G, E	Dt E Dt, G	Dt G Dt, G Dt, E G, E Dt, G, E	Dt G Dt, G Dt, E G, E Dt, G, E
	$p \geq 20$	G, E	G, E G		
$G \geq 4$	$p < 10$	G E	Dt	E Dt, G	
	$10 \leq p < 20$	Dt Dt, G G, E Dt, E	G E Dt, G G, E	Dt G Dt, G, E	Dt G E Dt, G Dt, E G, E Dt, G, E
	$p \geq 20$	Dt, G, E	Dt, G, E Dt, E	G, E Dt, E	

Quadro 3.3.2.2 - Representação esquemática das componentes dos *vectores de prioridades* para a Região da Andaluzia

Analisando as figuras 3.3.1.11 a 3.3.1.14 e os quadros 3.3.2.1 e 3.3.2.2, verifica-se que os *vectores de prioridades* determinados permitem concluir o seguinte:

- Tal como no estudo efectuado com *condições iniciais* fixas (ver 3.2.2), à medida que o valor de T0 aumenta, as combinações de factores vão-se concentrando no nível intermédio dos *vectores de prioridades*, o que indica que a um aumento do horizonte temporal corresponde

uma diminuição da influência das *condições iniciais*, no entanto, esta diminuição é menos notória na região da Lisboa.

Se nenhuma combinação de factores exercesse uma influência notória, cada componente do *vector de prioridades* teria um valor próximo de $100 / 7 = 14.3$. Note-se que o nível intermédio compreende este último valor, daí que quando T_0 aumenta as combinações de factores se vão concentrando nesse nível.

- A diferenciação nas componentes dos *vectores de prioridades* é agora muito mais notória do que a observada no estudo anterior, efectuado com *condições iniciais* fixas. Os resultados obtidos mostram também, que a combinação de factores *predominante* (com maior valor no *vector de prioridades*) pode variar com o horizonte temporal (contrariamente ao que sucedia no estudo anterior). Estes factos devem-se, essencialmente, à aleatoriedade subjacente às *condições iniciais* do estudo agora realizado: se, no estudo anterior, as 10000 simulações levadas a cabo partiam de uma dada *condição inicial*, agora gera-se aleatoriamente o conjunto de valores para as *condições iniciais* (pelo que podemos assumir 10000 simulações com diferentes *condições iniciais*).

Destaque-se ainda o carácter especial do factor Espaço: no estudo anterior, a não influência deste factor traduzia-se na atribuição de um valor **fixo** a E_{i-1} correspondente a uma *zona sísmica* não pertencente à região em estudo; agora, a não influência deste factor traduz-se pela geração de um valor correspondente a uma **qualquer zona sísmica** não pertencente à região em estudo.

Como tem sido referido, partindo de uma *condição inicial* e efectuando um número elevado - n - de simulações do processo de ocorrências, durante o período de tempo T_0 , é possível contabilizar valor de \bar{s} - número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a G_0 , na região em estudo - **região X**, durante o horizonte temporal T_0 .

Recorde-se que foram estudados 4 horizontes temporais: 7, 15, 30 e 90 dias. Considerem-se os sismos de magnitude maior ou igual a 4. Os quadros 3.3.2.3 e 3.3.2.4 apresentam os valores de \bar{s} obtidos.

Mag.	T0	Combinação de factores						
		Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
$4 \leq G < 5$	7 dias	0.0583	0.0093	0.0475	0.0000	0.0000	0.1327	0.0664
	15 dias	0.1418	0.0167	0.0774	0.0000	0.0990	0.1759	0.0954
	30 dias	0.1607	0.1583	0.1139	0.0441	0.2539	0.2462	0.1538
	90 dias	0.2651	0.2768	0.4344	0.2282	0.5653	0.5140	0.5073
$G \geq 5$	7 dias	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	15 dias	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0674	0.0290
	30 dias	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0089	0.0714	0.0290
	90 dias	0.0000	0.0673	0.0017	0.0107	0.0090	0.0713	0.0411
$G \geq 4$	7 dias	0.1498	0.0239	0.1221	-	0.1925	0.3410	0.1707
	15 dias	0.2018	0.0238	0.1103	-	0.1409	0.3462	0.1770
	30 dias	0.1296	0.1276	0.0919	0.0356	0.2119	0.2561	0.1474
	90 dias	0.0886	0.1150	0.1457	0.0798	0.1919	0.1956	0.1833

Quadro 3.3.2.3 - Valores de \bar{s} para a região de Lisboa.

Mag.	T0	Combinação de factores						
		Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
$4 \leq G < 5$	7 dias	0.1423	0.1050	0.1346	0.1906	0.2710	0.1783	0.3915
	15 dias	0.2493	0.2902	0.3843	0.2500	0.6546	0.3170	0.7274
	30 dias	0.4342	0.4242	0.5646	0.4484	0.8669	0.5319	0.7914
	90 dias	1.1048	1.3142	1.5446	1.1839	1.7441	1.4858	1.4977
$G \geq 5$	7 dias	0.0359	0.0341	0.0010	0.0269	0.0107	0.0887	0.0268
	15 dias	0.0360	0.0746	0.0319	0.0559	0.0107	0.0657	0.0268
	30 dias	0.0360	0.1074	0.0319	0.0593	0.0108	0.0955	0.0550
	90 dias	0.1627	0.1411	0.0688	0.0933	0.1265	0.1483	0.1259
$G \geq 4$	7 dias	0.1088	0.0850	0.0828	0.1328	0.1720	0.1631	0.2555
	15 dias	0.0899	0.1149	0.1311	0.0964	0.2096	0.1206	0.2376
	30 dias	0.1296	0.1276	0.0919	0.0356	0.2119	0.2561	0.1474
	90 dias	0.1179	0.1242	0.1525	0.1207	0.1768	0.1544	0.1535

Quadro 3.3.2.4 - Valores de \bar{s} para a região da Andaluzia.

Tal como no estudo efectuado em 3.2, as quatro estimativas pontuais de \bar{s} , correspondentes aos quatro horizontes temporais estudados, permitem propor um ajustamento linear com elevado coeficiente de correlação (ρ).

Para cada combinação de factores, testou-se o ajustamento linear aos 4 valores de \bar{s} , correspondentes aos quatro períodos de tempo estudados, ou seja, testou-se um ajustamento do tipo:

$$\bar{s}^-(t) = A + B.t$$

obtendo-se os resultados que se apresentam nos quadros 3.3.2.5 e 3.3.2.6.

Mag.	Combinação de factores							
		Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
$4 \leq G < 5$	A	0.0810	0.001	0.000	-	-	0.106	0.013
	B	0.0021	0.003	0.005	-	-	0.005	0.005
	ρ	0.9392	0.943	0.994	-	-	1.000	0.997
$G \geq 5$	A	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	-	-	-	-	-	-
	ρ	-	-	-	-	-	-	-
$G \geq 4$	A	0.081	-0.013	-0.001	-0.039	-0.009	0.140	0.026
	B	0.002	0.004	0.005	0.004	0.005	0.005	0.006
	ρ	0.939	0.976	0.994	0.985	0.998	0.985	0.999

Quadro 3.3.2.5 - Resultados do ajustamento linear efectuado para a região de Lisboa

Mag.	Combinação de factores							
		Dt	G	E	Dt, G	Dt, E	G, E	Dt, G, E
$4 \leq G < 5$	A	0.075	0.027	0.075	0.086	0.304	0.071	0.423
	B	0.011	0.014	0.016	0.012	0.016	0.016	0.012
	ρ	1.000	0.998	0.997	0.999	0.983	1.000	0.978
$G \geq 5$	A	0.010	0.051	0.009	0.035	-0.013	0.090	0.015
	B	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	ρ	0.967	0.892	0.925	0.929	0.967	0.985	0.995
$G \geq 4$	A	0.088	0.107	0.080	0.104	0.106	0.139	0.437
	B	0.013	0.014	0.017	0.015	0.016	0.017	0.013
	ρ	1.000	0.995	0.996	0.998	0.994	1.000	0.983

Quadro 3.3.2.6 - Resultados do ajustamento linear efectuado para a região da Andaluzia

Dado que o valor do coeficiente de correlação tem valores elevados, considera-se aceitável o ajustamento linear, nos casos em que é possível efectua-lo, tornando assim possível o cálculo de \bar{s}^- , para qualquer período de tempo entre 7 e 90 dias, sabendo-se que se partiu de um cenário correspondente a cada uma das combinações de factores estudadas.

3.3.3 - Conclusões

Comparou-se a influência de *condições iniciais* geradas aleatoriamente num modelo de simulação tridimensional (Tempo, Grandeza e Espaço) do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica (Costa, 1989).

A comparação da influência das *condições iniciais* foi feita com base em simulações do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, tendo-se utilizado valores de *condições iniciais* gerados aleatoriamente (dentro de certos limites).

Estudaram-se as combinações de factores: Dt; G; E; Dt,G; Dt,E; G,E e Dt,G,E.

O estudo efectuado considerou duas regiões: Lisboa e Andaluzia, quatro períodos de tempo: 7, 15, 30 e 90 e consideraram-se os seguintes níveis de magnitude:

$$4 \leq G < 5,$$

$$G \geq 5 \text{ e}$$

$$G \geq 4.$$

Os resultados obtidos permitem avançar com três conclusões:

- a) Tal como no estudo anterior (com *condições iniciais* fixas), pode observar-se que, em ambas as regiões, a diferenciação das componentes dos *vectores de prioridades* vai diminuindo à medida que o horizonte temporal aumenta, o que indica que a influência das *condições iniciais* diminui com o tempo.
- b) Os resultados obtidos exibem uma diferenciação nas componentes dos *vectores de prioridades* muito mais notória do que a observada no estudo anterior.
- c) Os resultados obtidos mostram que a combinação de factores *predominante* pode variar com o horizonte temporal (contrariamente ao que sucedia no estudo anterior).

As conclusões b) e c) devem-se essencialmente à aleatoriedade subjacente às *condições iniciais* do estudo agora realizado: se, no estudo anterior, as 10000 simulações levadas a cabo partiam de uma dada *condição inicial*, agora gera-se aleatoriamente o conjunto de valores para as *condições iniciais* (pelo que podemos assumir 10000 simulações com *diferentes condições iniciais*).

3.4 - Conclusão

Comparou-se a influência de *condições iniciais* geradas aleatoriamente num modelo de simulação tridimensional (Tempo, Grandeza e Espaço) do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica (Costa, 1989).

A comparação da influência das *condições iniciais* foi feita com base em simulações do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, tendo-se utilizado *condições iniciais* com valores arbitrados (secção 3.2) e *condições iniciais* com valores gerados aleatoriamente (secção 3.3).

Nas secções 3.2 e 3.3 estudaram-se as combinações de factores: Dt; G; E; Dt,G; Dt,E; G,E e Dt,G,E.

Seleccionaram-se duas regiões a estudar:

- Lisboa (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 1 e 7) e
- Andaluzia (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 2 e 3).

O quadro seguinte sintetiza as experiências efectuadas:

Tipo de <i>condições iniciais</i>	arbitradas	aleatórias
Medidas de performance	r	\bar{s}
Níveis de magnitude	$4 \leq G < 5$ e $G \geq 5$	$4 \leq G < 5$, $G \geq 5$ e $G \geq 4$

Quadro 3.4.1 - Síntese das experiências efectuadas no estudo das *condições iniciais*

sendo:

- r - número de simulações em que se verificou, **pelo menos**, uma ocorrência de magnitude superior ou igual a G_0 (ou entre dois valores estabelecidos de magnitude) na região X, durante o horizonte temporal T_0 , sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico (*condição inicial*).

- \bar{s} : número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a G_0 (ou entre dois valores estabelecidos de magnitude) que ocorreram na região X, durante o período de tempo T_0 , sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico (condição inicial).

Como normalmente se utilizam valores de probabilidades de ocorrência para comparar cenários sísmicos reais, optou-se por utilizar r no estudo comparativo de *condições iniciais arbitradas* (veja-se 3.2), utilizando-se \bar{s} para o estudo da influência de *condições iniciais geradas aleatoriamente* (veja-se 3.3), já que aí se pretende saber, qual ou quais os factores que, “em média” conduzem a um maior número de sismos de forte magnitude.

Utilizou-se a metodologia AHP para comparar a influencia das *condições iniciais* no processo de ocorrências sísmicas. Relativamente à aplicação desta metodologia, considera-se que o pressuposto de independência entre as características comparadas (num dado nível), subjacente à metodologia AHP, nem sempre é tido em conta, especialmente aquando da comparação da influência de *condições iniciais* geradas aleatoriamente (veja-se 3.3). Porém, o pressuposto de independência entre as características comparadas não é tido em conta em muitas aplicações práticas (veja-se o exemplo apresentado por Saaty ((Saaty, 1990), pág. 128).

A aplicação proposta nesta Dissertação, pela própria natureza do fenómeno físico envolvido, não permite afirmar, nem rejeitar linearmente o respeito pelo referido pressuposto.

Da análise dos resultados verifica-se que, **em todos os casos e para ambas as regiões estudadas**, à medida que o horizonte temporal aumenta, diminui a diferença nos valores das componentes dos *vectores de prioridades*, o que significa que **a influência das condições iniciais diminui com o tempo**, sendo muito pequena ao fim de três meses.

Comparando os resultados efectuados com *condições iniciais* cujos valores são fixos (ver 3.2), com *condições iniciais* cujos valores são gerados aleatoriamente (ver 3.3), verifica-se que, no segundo caso, existe uma maior diferenciação nos valores das componentes dos *vectores de prioridades* correspondentes às sete combinações de factores estudadas, sendo, no entanto, menos clara a(s) combinação(es) de factores predominantes em cada uma das regiões estudadas.

De realçar o âmbito muito mais abrangente do estudo efectuado com *condições iniciais geradas* aleatoriamente, se bem que este processo não seja aplicável à comparação de **cenários sísmicos reais**.

Capítulo 4

ANÁLISE DO PRECURSOR SISMICIDADE LOCAL

4.1 - Introdução

Muitos são os relatos de sismos de forte magnitude que foram precedidos por ***abalos premonitórios***, de magnitude fraca, por vezes só perceptíveis em aparelhos de precisão.

Grandori, Guagenti e Perotti (Grandori, Guagenti e Perotti, 1988) chegaram mesmo a provar, para as regiões Italianas de Garfagnana, Friuli e Irpinia, que a probabilidade de um sismo de forte magnitude ser precedido por sismos premonitórios é de cerca de 50%.

Segundo Schiller (Schiller, 1984) na região Chinesa de Haiching, antes do sismo de 4 de Fevereiro de 1975, que atingiu a magnitude de 7.3 na escala de Richter, os instrumentos registaram uma nítida intensificação de pequenos abalos sísmicos.

Parece, assim, aceitável considerar-se que a ***Sismicidade Local*** - número de sismos de qualquer magnitude, registados numa região, durante um intervalo de tempo T_0 - deve constituir um precursor sísmico.

De referir que, o catálogo utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) engloba registos sísmicos correspondentes a ocorrências de magnitudes fortes ou fracas, pelo que é possível avaliar a *Sismicidade Local* a partir dele.

Recorde-se que o modelo adoptado para a simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, considera *condições iniciais* que envolvem os dois últimos intervalos de tempo entre ocorrências consecutivas. Adicionalmente é importante recordar que essas duas últimas

ocorrências poderão corresponder a qualquer local da Península Ibérica. Ora é sabido que a ocorrência de um sismo de grande magnitude, em determinado local é, geralmente precedido por um número significativo de pequenos sismos, nesse local, ou na sua proximidade. Assim, é fácil de entender que as *condições iniciais* não são, por si só, suficientes para permitir a avaliação da *Sismicidade Local*.

4.2 - Sismicidade Local

Com vista a uma primeira análise do precursor Sismicidade Local, contabilizou-se, a partir do catálogo referido, para as regiões de Lisboa e Andaluzia, e para cada período de 5 anos:

- o número de sismos de qualquer magnitude;
- o número de sismos de média magnitude ($4 \leq G < 5$) e
- o número de sismos de forte magnitude ($G \geq 5$).

Esta primeira análise, de carácter algo *grosseiro*, permite constatar, pelas figuras 4.2.1 e 4.2.2 que, em ambas as regiões, os períodos de tempo em que se verificaram sismos de média ou forte magnitude são precedidos, ou correspondem, a períodos de tempo com elevado número de sismos de qualquer magnitude.

Embora estes gráficos se baseiem em intervalos de tempo demasiado grandes (5 anos), a relação entre o número de sismos de qualquer magnitude e o número de sismos de magnitude superior ou igual a 4, nas regiões estudadas, é claramente visível.

Por exemplo, na região de Lisboa, no período de tempo 1905-1910 ocorreram sismos de média e forte magnitude (o que felizmente não é a norma). Na figura 4.2.1 pode verificar-se que, no mesmo período de tempo houve um aumento muito acentuado do número de ocorrências sísmicas de qualquer magnitude. Situação idêntica pode ser observada para a região da Andaluzia, no período de tempo 1905-1915.

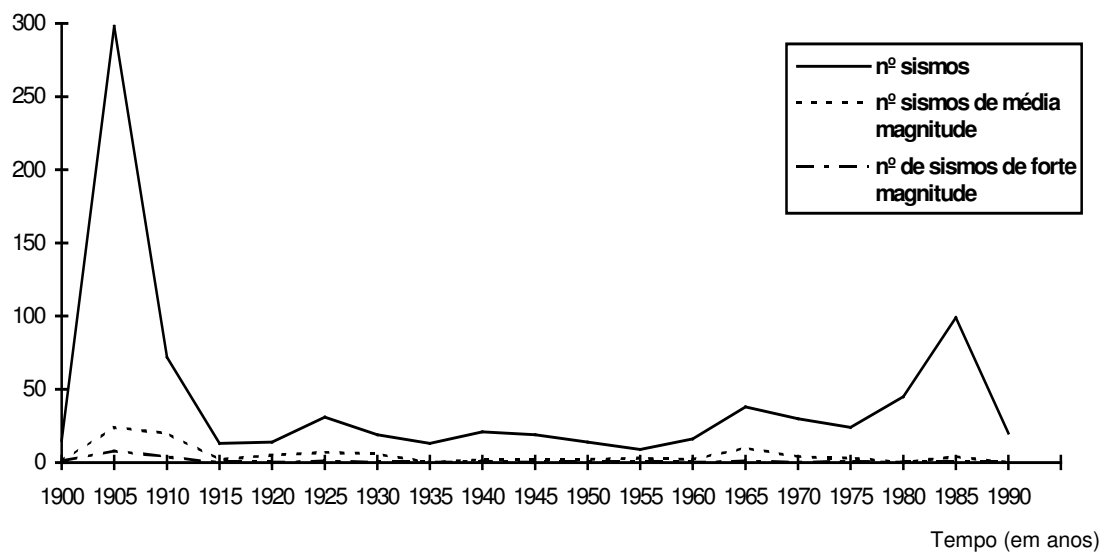


Figura 4.2.1 - Número de ocorrências sísmicas em períodos de 5 anos na região de Lisboa

No entanto, na região da Andaluzia, entre 1980 e 1985, registou-se um aumento muito acentuado do número de ocorrências sísmicas de qualquer magnitude, sem que no entanto se tenha verificado um número expressivo de sismos de forte magnitude, naquela região, por essa altura ou pouco tempo depois.

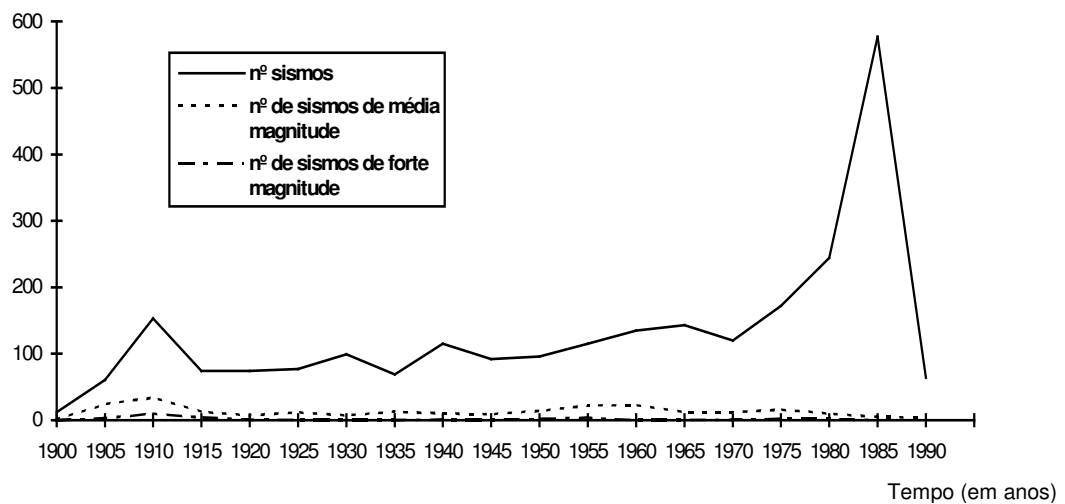


Figura 4.2.2 - Número de ocorrências sísmicas em períodos de 5 anos na região da Andaluzia

Verificou-se assim, ainda que de forma *grosseira* que, nas regiões estudadas, os sismos de forte magnitude estão normalmente relacionados com o aumento do número de sismos (de qualquer magnitude) na mesma região, ou seja, com o aumento da ***Sismicidade Local***.

Com vista a um estudo mais detalhado da *Sismicidade Local*, considerem-se ***os intervalos de tempo entre ocorrências consecutivas, numa dada região, Dtr***. (Não se deve confundir estes valores com os valores de Dt - intervalo de tempo entre ocorrências consecutivas na Península Ibérica).

Se os abalos de forte magnitude forem precedidos por um aumento da *Sismicidade Local*, então os valores de Dtr , durante os períodos de tempo T_0 , que precederam os sismos de média ou forte magnitude devem ser substancialmente inferiores aos valores de Dtr , obtidos durante um longo período de tempo.

A figura 4.2.3 esquematiza o processo de ocorrências sísmicas, numa determinada zona, tendo-se assinalado os valores de Dtr correspondentes aos períodos de tempo T_0 que precederam ocorrências de magnitude maior ou igual a G_0 .

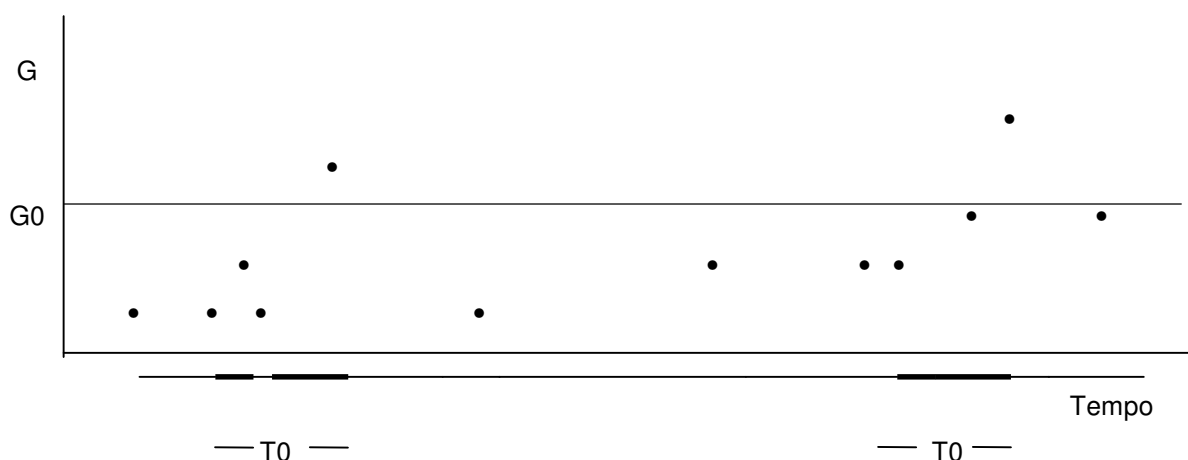


Figura 4.2.3 - Representação esquemática do processo de ocorrências sísmicas numa determinada zona

Pretende-se verificar se, o valor médio de Dtr relativo a um longo período de tempo, difere “significativamente” do valor médio de Dtr , obtido apenas durante os períodos de tempo T_0 que precederam sismos de média ou forte magnitude.

4.2.1 - Experiências efectuadas

Seleccionaram-se duas regiões da Península Ibérica:

- **Lisboa** (*zonas sísmicas* nºs 1 e 7) e
- **Andaluzia** (*zonas sísmicas* nºs 2 e 3).

A partir do catálogo utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992), determinaram-se as estatísticas de Dtr, correspondentes ao período de tempo após 1900. O quadro 4.2.1.1 apresenta os resultados obtidos.

Estatísticas	Lisboa	Andaluzia
Valor Médio	0.10858	0.03588
Desvio Padrão	0.22113	0.06442
n	808	2490
Mínimo	0.00000	0.00000
percentil 10%	0.00007	0.00030
percentil 20%	0.00035	0.00152
percentil 30%	0.00126	0.00371
percentil 40%	0.00389	0.00753
percentil 50%	0.01434	0.01305
percentil 60%	0.03773	0.02123
percentil 70%	0.07765	0.03243
percentil 80%	0.15336	0.05470
percentil 90%	0.32691	0.09546
Máximo	2.14607	0.85183
I = I.C. a 95% para o valor médio de Dtr	[0.09327 - 0.12391]	[0.03335 - 0.03841]

Quadro 4.2.1.1 - Estatísticas de Dtr, para as regiões de Lisboa e Andaluzia

De referir que, foi possível determinar **I**, o intervalo de confiança (a 95 %) para o valor médio de Dtr, dado o elevado número de valores de Dtr, tanto para a região de Lisboa como para a região da Andaluzia.

Com efeito, este intervalo é dado por

$$[\bar{x} - z_{0.975} \cdot s / \sqrt{n}, \bar{x} + z_{0.975} \cdot s / \sqrt{n}]$$

sendo \bar{x} o valor médio de Dtr, s o respectivo desvio padrão e $z_{0.975}$ o quantil 0.975 da distribuição Normal reduzida.

Determinou-se, posteriormente, o valor médio de Dtr, durante os períodos de tempo T_0 que precederam sismos de média ou forte magnitude, quer isto dizer que, de entre os valores de Dtr se consideraram apenas aqueles que precederam sismos de média ou forte magnitude.

Pretende-se verificar se, o valor médio de Dtr correspondente a estes períodos de tempo T_0 é “significativamente” inferior ao valor médio de Dtr, calculado ao longo de um grande período de tempo, neste caso após 1900.

Considere-se a amostra constituída por todos os valores de Dtr obtidos numa dada região, durante um longo período de tempo. Considere-se também outra amostra constituída pelos valores de Dtr, que se verificaram dentro do período de tempo T_0 que precedeu sismos de média ou forte magnitude, na mesma região.

Para que se possa efectuar um teste estatístico à diferença de médias das amostras anteriores, a população subjacente deve ter distribuição Normal (veja-se, por exemplo, (Murteira, 1979)). Como se pode ver nas figuras 4.2.1.1 e 4.2.1.2, em ambas as regiões estudadas, a distribuição dos valores de Dtr, relativos ao período de tempo após 1900, é fortemente assimétrica, o que impossibilita a verificação do pressuposto de os valores de Dtr pertencerem a uma população com distribuição Normal.

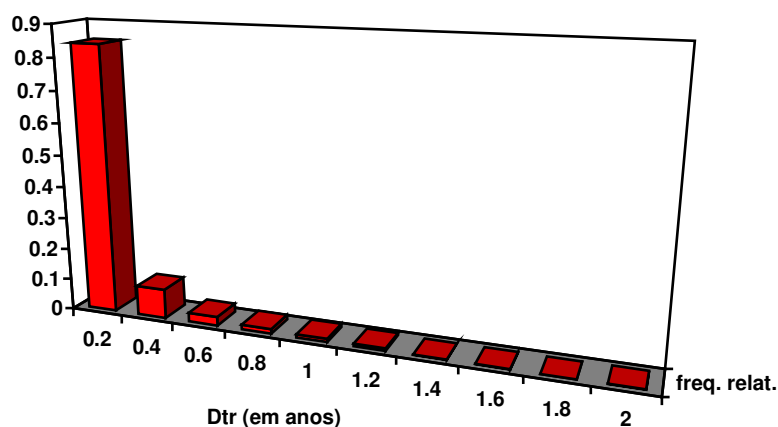


Figura 4.2.1.1 - Histograma de frequências relativas de Dtr, para a região de Lisboa

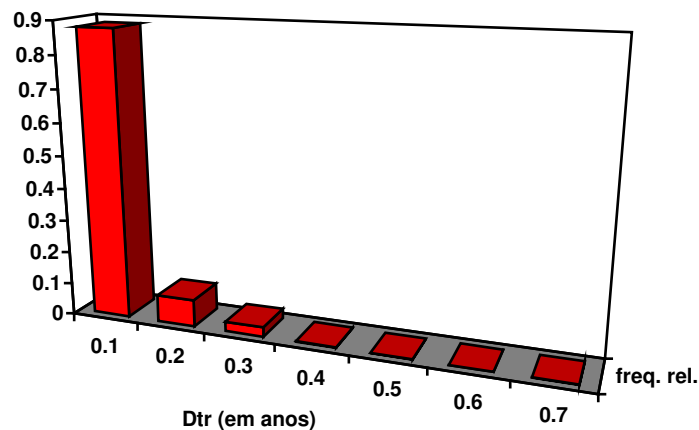


Figura 4.2.1.2 - Histograma de frequências relativas de Dtr, para a região da Andaluzia

Assim, considerou-se preferível verificar se o valor médio de Dtr, obtido no período de tempo T0 que precedeu sismos de média ou forte magnitude, pertence ou não ao intervalo de confiança a 95% para o valor médio de Dtr, calculado durante um longo período de tempo, ou seja a partir de 1900. Recorde-se que foi possível determinar este intervalo de confiança dada a grande dimensão da amostra, o que possibilita a aplicação do Teorema do Limite Central, mesmo para distribuições assimétricas.

Sempre que o valor médio de Dtr, para os períodos de tempo que precederam ocorrências de média ou fraca magnitude, se situar fora do intervalo de confiança (a 95 %) para o valor médio de Dtr, relativo a um longo período de tempo, considera-se que os dois valores médios diferem significativamente, ou seja, a *Sismicidade Local* nos períodos de tempo que precederam sismos de média ou fraca magnitude é significativamente diferente da “*Sismicidade Local média*”, na região, durante o horizonte temporal considerado. Caso contrário, admite-se não existir alteração significativa da *Sismicidade Local* nos períodos de tempo que precederam sismos de média ou fraca magnitude.

Consideraram-se os seguintes valores de T0: 7, 15 e 30 dias, 3 e 6 meses, 1, 2, 3, 4 e 5 anos.

T0	Lisboa		Andaluzia	
	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$	$4 \leq G < 5$	$G \geq 5$
7 dias	0.07943	0.02382	0.04374	0.02600
15 dias	0.06970	0.02809	0.03854	0.02184
1 mês	0.06269	0.02684	0.03881	0.02828
3 meses	0.06934	0.02135	0.03812	0.03125
6 meses	0.07975	0.02661	0.03616	0.03557
1 ano	0.08840	0.03652	0.03573	0.03865
2 anos	0.09975	0.04698	0.03510	0.04062
3 anos	0.10363	0.05663	0.03624	0.04308
4 anos	0.10776	0.06361	0.03626	0.04424
5 anos	0.10915	0.06868	0.03626	0.04440

Quadro 4.2.1.2 - Valor médio de Dtr durante o período de tempo T0 que precedeu sismos de média e forte magnitude, nas regiões de Lisboa e Andaluzia

As figuras 4.2.1.3 e 4.2.1.4 apresentam o valor médio de Dtr durante os períodos de tempo T0 que precederam sismos de média e forte magnitude, para as regiões de Lisboa e Andaluzia, respectivamente. Nestas duas figuras assinalou-se também o valor médio de Dtr para o período de tempo posterior a 1900, bem como os limites do respectivo intervalo de confiança a 95%.

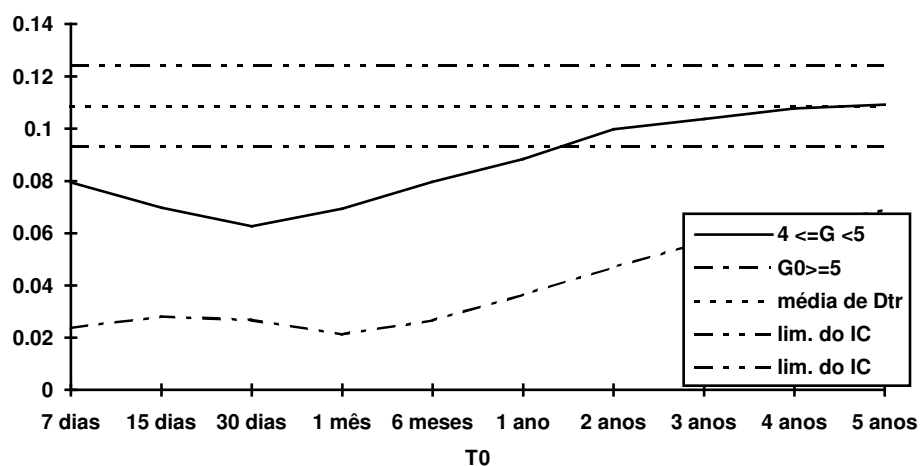


Figura 4.2.1.3 - Valor médio de Dtr durante os períodos de tempo T0 que precederam sismos de média e forte magnitude, na região de Lisboa

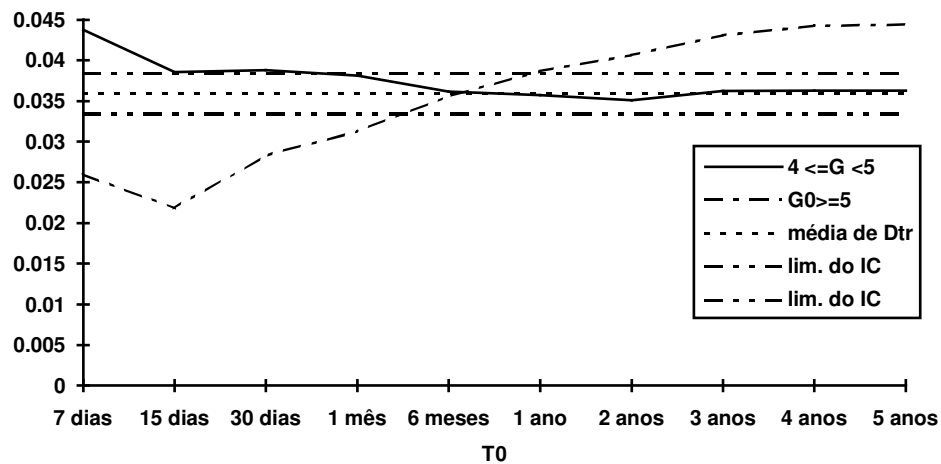


Figura 4.2.1.4 - Valor médio de Dtr durante os períodos de tempo T0 que precederam sismos de média e forte magnitude, na região da Andaluzia

4.2.2 - Análise de resultados

Observando as figuras 4.2.1.3 e 4.2.1.4 pode concluir-se o seguinte:

- Na região de Lisboa, o valor médio de Dtr durante os períodos de tempo estudados, que precederam sismos de forte magnitude, é significativamente diferente do valor médio de Dtr na região de Lisboa (valor calculado durante o período após 1900). Conclui-se assim, que houve alteração significativa da *Sismicidade Local* nos períodos de tempo que precederam sismos de forte magnitude.
 - Relativamente aos sismos de média magnitude, apenas para horizontes temporais inferiores a um ano se pode concluir que houve uma diferença significativa do valor médio de Dtr durante os períodos de tempo que precederam sismos de média magnitude, em relação à "*Sismicidade Local média*".
- 7• Como já foi anteriormente referido, a região da Andaluzia regista um número de ocorrências sísmicas muito superior ao da região de Lisboa (veja-se o quadro 4.2.1.1), pelo que é de esperar que, nesta região, a *Sismicidade Local* tenha uma expressão menos óbvia. Com efeito, a região da Andaluzia é constituída pelas *zonas sísmicas*

números 2 e 3, que são precisamente as duas *zonas sísmicas* com maior número de ocorrências de toda a Península Ibérica, tornando-se assim difícil distinguir aumentos de *Sismicidade Local*.

- O valor médio de Dtr, nos períodos de tempo que precederam sismos de forte magnitude, difere significativamente da “*Sismicidade Local média*”, até horizontes temporais de pouco mais de um mês.
- No caso de sismos de média magnitude, não se detectou diferenciação significativa da *Sismicidade Local* nos períodos de tempo que precederam os abalos sísmicos.
- Nas figuras referidas destaca-se também a diminuição da diferenciação entre a *Sismicidade Local* nos períodos que precedem sismos de média ou forte magnitude, e a “*Sismicidade Local média*”, com o aumento do horizonte temporal.

De realçar que, tal como no precursor Condições Iniciais, também o precursor Sismicidade Local perde expressividade com o aumento do horizonte temporal.

4.3 - Conclusão

Estudou-se o precursor Sismicidade Local - número de sismos de qualquer magnitude, numa região.

Estudaram-se as regiões de:

- Lisboa (a que correspondem a *zonas sísmicas* números 1 e 7) e
- Andaluzia (a que correspondem a *zonas sísmicas* números 1 e 7).

Consideraram-se os seguintes horizontes temporais: 7, 15 e 30 dias, 3 e 6 meses, 1, 2, 3, 4 e 5 anos.

Verificou-se que, para as regiões estudadas, os sismos de média e forte magnitude são, normalmente, precedidos por um aumento do número de pequenos sismos na região em causa.

Capítulo 5

GRAU DE ALARME DO PRECURSOR CONDIÇÕES INICIAIS

5.1 - Introdução

Na secção 3.2 apresentou-se uma metodologia que permite comparar várias *condições iniciais*, não se tendo determinado o grau de alarme associado a cada uma delas. Contudo, constatou-se que as *condições iniciais*, ou seja o “passado sísmico recente” influi, de forma significativa no processo de ocorrências sísmicas, especialmente a curto prazo. Pode então afirmar-se que as *condições iniciais* constituem um ***precursor sísmico***.

No sistema de alarme sísmico que se pretende construir, cada precursor sísmico deve ter associado um grau de alarme, sendo depois combinados os diversos graus de alarme relativos a cada precursor, de forma a obter-se o grau de ***alarme total - grau de alarme sísmico numa região***.

Relativamente ao precursor Condições Iniciais, o sistema deve associar, a cada cenário sísmico recente (expresso nas *condições iniciais* do modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas), um ***grau de alarme relativo ao precursor Condições Iniciais - ga_{CI}*** .

Adoptou-se uma escala de limites 0 e 100, tal que, partindo de um determinado cenário sísmico (e consequentemente, de uma *condição inicial*), quanto maior for a probabilidade de ocorrer um sismo na região em causa, durante determinado período de tempo, maior seja o valor ga_{CI} nessa escala. Embora nada obrigue a que os limites da escala sejam 0 e 100, esta escala pode ser associada a valores percentuais, o que facilmente se adapta à intuição humana.

Partindo de uma determinada *condição inicial*, e simulando o processo de ocorrências sísmicas numa determinada região, durante um certo período de tempo, deve ser possível avaliar o “grau de preocupação”, ou grau de alarme associado a essa *condição inicial*.

Neste capítulo apresenta-se uma metodologia que permite determinar o grau de alarme relativo ao precursor Condições Iniciais.

Testaram-se 12 *condições iniciais reais*, ou seja, que ocorreram na Península Ibérica e constam do catálogo utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992), e 10 *condições iniciais fictícias*, cujos valores foram gerados aleatoriamente, dentro de certos limites.

Estudaram-se duas regiões: **Lisboa** (*zonas sísmicas* números 1 e 7), **Andaluzia** (*zonas sísmicas* números 2 e 3), dos horizontes temporais: **7 e 15 dias**, tendo-se considerado apenas os sismos de magnitude Richter maior ou igual a 4.

5.2 - Grau de alarme do precursor Condições Iniciais

Para determinar o grau de alarme do precursor Condições Iniciais, utilizou-se a medida de performance \bar{s} . Poder-se-ia também utilizar r , no entanto esta última variável refere-se ao número de simulações em que se verificou, **pelo menos**, uma ocorrência de magnitude superior ou igual a G_0 , na região X, durante o horizonte temporal T_0 , sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico, não indicando se, dentro desse horizonte temporal, ocorreriam ou não, mais abalos sísmicos.

Como o objectivo agora é determinar um grau de alarme, faz mais sentido utilizar uma variável que permita também contabilizar os “outros sismos” que ocorreriam dentro do horizonte temporal T_0 .

Adoptou-se então como medida de performance \bar{s} - número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a G_0 (ou entre dois valores estabelecidos de magnitude) que ocorreram na região X, durante o período de tempo T_0 , sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico.

Pretende-se encontrar um processo que, a cada *condição inicial* (e correspondente valor \bar{s}), associe um grau de alarme, de tal modo que quanto maior for \bar{s} mais alarmante seja o cenário sísmico.

Como já foi dito, ga_{CI} deve estar compreendido entre 0 e 100, pelo que, para que possa haver correspondência entre \bar{s} e ga_{CI} , \bar{s} deve também estar compreendido entre um valor máximo e um valor mínimo.

Para se determinar estes valores procedeu-se da seguinte forma: A partir do catálogo utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) determinaram-se os valores mínimo e máximo de Dt e G , observados em toda a Península Ibérica a partir de 1900. O quadro 5.2.1 apresenta estes valores.

	mínimo	máximo
Dt	0.00000	0.39305
G	0.76	7.3

Quadro 5.2.1 - Valores mínimo e máximo de Dt (em anos) e G (mag. Richter) observados na Península Ibérica

Note-se que o menor valor de Dt observado corresponde apenas a alguns segundos, o que expresso em anos e com 5 casas decimais se traduz em 0.00000.

O menor valor de G registado no referido catálogo é 0.0, mas esse valor corresponde, normalmente, a ocorrências de magnitude desconhecida. Por isso adoptou-se o valor 0.76, que corresponde ao **menor valor registado diferente de zero**. Além do mais, 0 ou 0.76 são ambos valores de magnitude tão baixa, que é irrelevante a escolha de um ou outro valor.

Recorde-se que, no modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas utilizado (Costa, 1989), a geração de Dt e G é feita com base em distribuições empíricas condicionadas, da seguinte forma:

$$(Dt_{i-2}, Dt_{i-1}) \rightarrow Dt_i$$

$$(Dt_i, G_{i-2}, G_{i-1}) \rightarrow G_i$$

$$(Dt_i, G_i, E_{i-1}) \rightarrow E_i$$

Por outro lado, verificou-se que, se as duas últimas ocorrências são recentes é maior a probabilidade de ocorrer um sismo de forte magnitude, num futuro próximo, do que se as últimas ocorrências tiverem tido lugar há bastante tempo (veja-se 3.1).

Como os valores de $D_{t_{i-2}}$ e $D_{t_{i-1}}$ seleccionam uma de entre 20 distribuições condicionadas de D_{t_i} por $D_{t_{i-2}}$ e $D_{t_{i-1}}$ (ver (Costa, 1989) pag. 52 a 56) é de esperar que, se se atribuírem valores pequenos a $D_{t_{i-2}}$ e $D_{t_{i-1}}$ (próximos do menor valor observado), o valor gerado de D_{t_i} seja também reduzido.

Por outro lado D_{t_i} , G_{i-2} e G_{i-1} condicionam a selecção de uma das 10 distribuições condicionadas de G_i por D_{t_i} , G_{i-2} e G_{i-1} (ver (Costa, 1989) pag. 114 a 115). Então, se D_{t_i} for pequeno e G_{i-2} e G_{i-1} tiverem valores elevados (próximos do maior valor observado), o valor de G_i gerado deve ser elevado.

Relativamente ao factor Espaço o processo não é assim tão simples, visto este factor não ser de natureza contínua. Na realidade o factor E foi caracterizado com base em 21 *zonas sísmicas*.

A concretização das *condições iniciais* com

- valores reduzidos de $D_{t_{i-1}}$ e $D_{t_{i-2}}$;
- valores elevados de G_{i-1} e G_{i-2} ;
- E_{i-1} correspondente à *zona sísmica* com maior número de ocorrências sísmicas;

poderia, à priori, parecer suficiente para assegurar a estimação (por simulação) do valor máximo do valor médio de s em n simulações - \bar{s} max.

Porém, tal não acontece, visto que as *zonas sísmicas* não foram definidas **apenas** com base no número de ocorrências sísmicas (ver (Costa, 1989) pag. 86 a 94).

Assim, visando estimar-se o valor máximo referido, \bar{s} max, optou-se por simular o processo de ocorrências sísmicas 10000 vezes, iniciando-se as simulações com valores reduzidos de $D_{t_{i-1}}$ e $D_{t_{i-2}}$, iguais a 0.000002 ano \approx 1 minuto, valores elevados de G_{i-1} e G_{i-2} , iguais a 7.5 magnitude Richter, e experimentar **todos** os valores possíveis de E_{i-1} . Para cada zona sísmica (E_{i-1}) obteve-se um valor de \bar{s} . Designar-se-á este processo por **situação A** (para simplificar o texto). O maior valor de \bar{s} assim obtido designar-se-á por \bar{s} max.

Analogamente, simulou-se o processo de ocorrências sísmicas, utilizando agora os valores máximos observados para D_{i-1} e D_{i-2} e os mínimos para G_{i-1} e G_{i-2} e fazendo variar o valor de E_{i-1} de forma a cobrir **toda** a Península Ibérica. Designe-se este processo por **situação B**. O menor valor de \bar{s} assim obtido designar-se-á por \bar{s}_{\min} .

Os valores apresentados nos quadros 5.2.2 e 5.2.3, referentes às regiões de Lisboa e Andaluzia, foram determinados como se referiu anteriormente, tendo-se efectuado 10000 simulações do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, em que se contabilizaram as ocorrências com magnitude superior ou igual a 4.0 durante, respectivamente, períodos de 7 e 15 dias.

E_{i-1}	Situação A		Situação B	
	Lisboa	Andaluzia	Lisboa	Andaluzia
1	0.1010	0.0370	0.0123	0.0488
2	0.0603	0.3850	0.0085	0.0542
3	0.0639	0.3594	0.0123	0.0525
4	0.1044	0.2816	0.0138	0.0442
5	0.0774	0.3168	0.0095	0.0524
6	0.0541	0.3059	0.0082	0.0475
7	0.0701	0.3451	0.0108	0.0535
8	0.0805	0.3013	0.0108	0.0450
9	0.0643	0.3137	0.0074	0.0511
10	0.0664	0.2877	0.0089	0.0509
11	0.0593	0.3280	0.0087	0.0501
12	0.0690	0.3153	0.0104	0.0498
13	0.0679	0.2968	0.0103	0.0455
14	0.0649	0.2910	0.0094	0.0490
15	0.0725	0.3194	0.0132	0.0502
16	0.0575	0.2508	0.0084	0.0432
17	0.0717	0.2973	0.0091	0.0442
19	0.0519	0.2852	0.0089	0.0367
20	0.0573	0.2980	0.0077	0.0464
21	0.0671	0.3463	0.0091	0.0528

Quadro 5.2.2 - Valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4.0, para períodos de 7 dias, em função de E_{i-1} , para as situações A e B

E_{i-1}	Situação A		Situação B	
	Lisboa	Andaluzia	Lisboa	Andaluzia
1	0.1333	0.4470	0.0346	0.1533
2	0.0860	0.5251	0.0275	0.1616
3	0.0874	0.5043	0.0316	0.1574
4	0.1345	0.4177	0.0376	0.1424
5	0.1120	0.4568	0.0293	0.1638
6	0.0854	0.4475	0.0285	0.1449
7	0.1039	0.4839	0.0338	0.1613
8	0.1080	0.4415	0.0314	0.1456
9	0.0911	0.4574	0.0247	0.1601
10	0.0908	0.4329	0.0296	0.1570
11	0.0897	0.4692	0.0263	0.1542
12	0.1044	0.4607	0.0288	0.1516
13	0.0964	0.4386	0.0308	0.1448
14	0.0944	0.4373	0.0282	0.1536
15	0.0976	0.4691	0.0327	0.1531
16	0.0873	0.3944	0.0294	0.1434
17	0.0955	0.4409	0.0315	0.1460
19	0.0760	0.4325	0.0277	0.1278
20	0.0815	0.4351	0.0265	0.1453
21	0.0971	0.4902	0.0301	0.1596

Quadro 5.2.3 - Valor médio do número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4.0, para períodos de 15 dias, em função de E_{i-1} , para as situações A e B

O quadro 5.2.4 apresenta as *condições iniciais* correspondentes ao menor e maior valor de \bar{s} obtidos, respectivamente, \bar{s} min e \bar{s} max.

	Região de Lisboa		Região da Andaluzia	
	\bar{s} min	\bar{s} max	\bar{s} min	\bar{s} max
Dt_{i-1}	0.5	0.000002	0.5	0.000002
Dt_{i-2}	0.5	0.000002	0.5	0.000002
G_{i-2}	0.5	7.5	0.5	7.5
G_{i-1}	0.5	7.5	0.5	7.5
E_{i-1}	9	4	19	2

Quadro 5.2.4 - *Condições iniciais* correspondentes a \bar{s} min e \bar{s} max

Ou valores apresentados para \bar{s} min e \bar{s} max são valores médios, logo o valor de \bar{s} correspondente a uma *condição inicial* qualquer, pode ser superior a \bar{s} max ou inferior a \bar{s} min.

Recorde-se que os valores médios de \mathbf{s} foram obtidos com base em 10000 simulações do processo de ocorrências sísmicas.

Para cada uma das *condições iniciais* apresentadas no quadro 5.2.4 é possível obter o valor médio e desvio padrão de \mathbf{s} nessa amostra de grande dimensão.

		Lisboa		Andaluzia	
		Sit. B	Sit. A	Sit. B	Sit. A
7 dias	\bar{s} min	0.0074	0.1044	0.0367	0.3850
	s_s min	0.0903	0.3260	0.2213	0.6671
15 dias	\bar{s} max	0.0247	0.1345	0.1278	0.5251
	s_s max	0.1622	0.3729	0.4196	0.8055

Nota: s_s designa desvio padrão de \mathbf{s}

Quadro 5.2.5 - Valores médios e desvios padrões, correspondentes às situações A e B

O quadro 5.2.5 apresenta, para as situações destacadas nos quadros 5.2.2 e 5.2.3 (correspondentes às *condições iniciais* apresentadas no quadro 2.4), os respectivos valores médios e desvios padrões.

Sabe-se que dada uma amostra de dimensão n de valores aleatórios independentes e identicamente distribuídos (X_1, X_2, \dots, X_n), provenientes de uma população com valor médio μ e variância σ^2 , o Teorema do Limite Central permite afirmar que a variável aleatória \bar{X}

$$\bar{X} \xrightarrow[n \rightarrow +\infty]{} \text{Normal}$$

Dada a grande dimensão da amostra, pode afirmar-se que o desvio padrão de \mathbf{s} - s_s , é uma estimativa pontual de σ e o valor médio de \mathbf{s} - \bar{s} é uma estimativa pontual de μ . Então o intervalo

$$\left[\bar{s} - z_{1-\alpha/2} \times s_s / \sqrt{n} ; \bar{s} + z_{1-\alpha/2} \times s_s / \sqrt{n} \right] ,$$

em que $z_{1-\alpha/2}$ é o quantil $1 - \alpha/2$ da distribuição Normal reduzida, é um intervalo de confiança a $1 - \alpha$ para o verdadeiro valor médio de \mathbf{s} .

Com vista à definição do domínio de variação provável de \bar{s} , isto é, um intervalo $[Li, Ls]$ que contenha, com elevada probabilidade, todos os valores de \bar{s} , considerou-se:

$$Li = \bar{s}_{\min} - 2.5758 \times s_{s_{\min}} / \sqrt{n} \quad \text{e} \quad Ls = \bar{s}_{\max} + 2.5758 \times s_{s_{\max}} / \sqrt{n}$$

que são, respectivamente, os limites inferior e superior dos intervalos de confiança a 99% para \bar{s}_{\min} e \bar{s}_{\max} .

Uma vez determinado o **domínio de variação provável de \bar{s}** , é necessário definir quando é que um valor de \bar{s} deve ser considerado “normal”, “moderadamente preocupante”, ou mesmo “preocupante”. Porém, não é fácil definir valores para delimitar os três subintervalos resultantes.

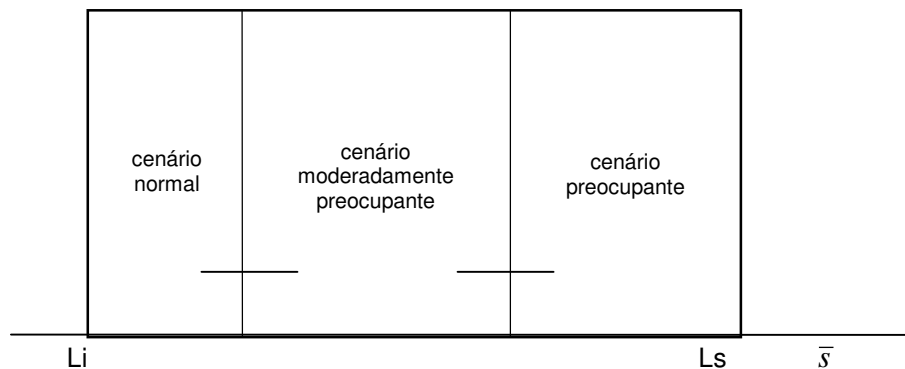


Figura 5.2.1 - Domínio de variação provável de \bar{s}

Considerem-se os três subintervalos disjuntos: A_1 , A_2 e A_3 , resultantes da divisão do intervalo $[Li, Ls]$, de forma a que cada um deles corresponda a um dos três cenários sísmicos referidos.

A divisão do domínio de variação provável ($[Li, Ls]$) em três subintervalos disjuntos correspondentes aos três cenários sísmicos referidos, permitirá, em função de um valor de \bar{s} , proceder à respectiva classificação. No entanto, pode imaginar-se uma situação em que uma pequena variação no valor de \bar{s} se traduza numa alteração da classificação atribuída. Tal situação decorre da natureza *rígida* do processo de classificação adaptado, que é contrario à forma intuitiva de classificar.

Com vista à ultrapassagem da limitação referida, recorreu-se à **Teoria dos Conjuntos Vagos ou Difusos**. Nesta teoria, um elemento pertence a um conjunto com um certo grau (veja-se, por exemplo (Kosko, 1994)). A noção clássica bivalente de pertença é substituída pela noção de pertença com certo grau. A função pertença, que na lógica tradicional toma valores no conjunto $\{0,1\}$, passa a tomar valores no intervalo real $[0,1]$.

Este tipo de conjuntos foi originalmente introduzido por L. A. Zadeh em 1965, com o nome de **“Fuzzy Sets” (Conjuntos Vagos ou Difusos)**, e não é mais do que uma tentativa de sistematizar mais precisamente conceitos que não obedecem à lógica bivalente de Aristóteles, isto é, conceitos onde os limites entre o “ter e o não ter” uma característica não são rígidos.

Os sistemas cujas regras lógicas se fundamentam nesta teoria têm o nome de **Sistemas de Controlo Vago**. Estes sistemas podem ser construídos em três passos fundamentais:

- 1- Definição das variáveis de entrada e saída do sistema (input e output);
- 2- Definição dos conjuntos vagos associados a cada variável;
- 3- Definição das regras lógicas que a cada input associam um output.

Relativamente à situação que se vem analisando, a Teoria dos Conjuntos Vagos pode ser utilizada, não só para a classificação de um cenário sísmico em função do respectivo valor de \bar{s} , mas também na definição do correspondente grau de alarme.

Assim pode conceber-se um Sistema de Controlo Vago, em que a **variável de entrada** é o valor médio de s , calculado com base num número elevado de simulações do processo de ocorrências sísmicas na Península, durante um intervalo de tempo $-T_0$, para a região que se pretende estudar, partindo-se da *condição inicial* cujo grau de alarme se pretende determinar e a **variável de saída** é o grau de alarme associado ao precursor Condições Iniciais.

Como se referiu anteriormente, a probabilidade de um valor de \bar{s} não pertencer ao domínio de variação provável de \bar{s} ($[Li, Ls]$) é muito baixa. Se tal situação ocorrer, e se o valor de \bar{s} observado for inferior a Li , então o correspondente grau de alarme do precursor Condições Iniciais deverá ser igual a zero. Caso \bar{s} exceda Ls , o correspondente grau de alarme do precursor Condições Iniciais deverá ser igual a 100 (o seu valor máximo).

Com vista à definição do Sistema de Controlo Vago referido, e por uma questão de simplificação de cálculos, o intervalo $[Li, Ls]$ é substituído pelo intervalo $A = [0, 1]$, através de uma transformação linear, em que $Li = 0$ e $Ls = 1$.

O valor normalizado de \bar{s} , \bar{s}_{norm} , é obtido da seguinte forma:

$$\bar{s}_{norm} = \frac{\bar{s} - Li}{Ls - Li}$$

A **variável de entrada, A**, será associada ao valor de \bar{s}_{norm} . Serão definidas três classificações de cenários sísmicos (normal, moderadamente preocupante e preocupante).

Designa-se por **centro** o correspondente valor de \bar{s}_{norm} associado ao ponto médio do intervalo correspondente ao cenário “moderadamente preocupante”.

Pode-se, agora, definir as três classificações de cenários sísmicos adoptadas:

A1 - situação sísmica normal - $[0, centro - 0.05]$;

A2 - situação sísmica moderadamente preocupante - $[centro - 0.1, centro + 0.1]$;

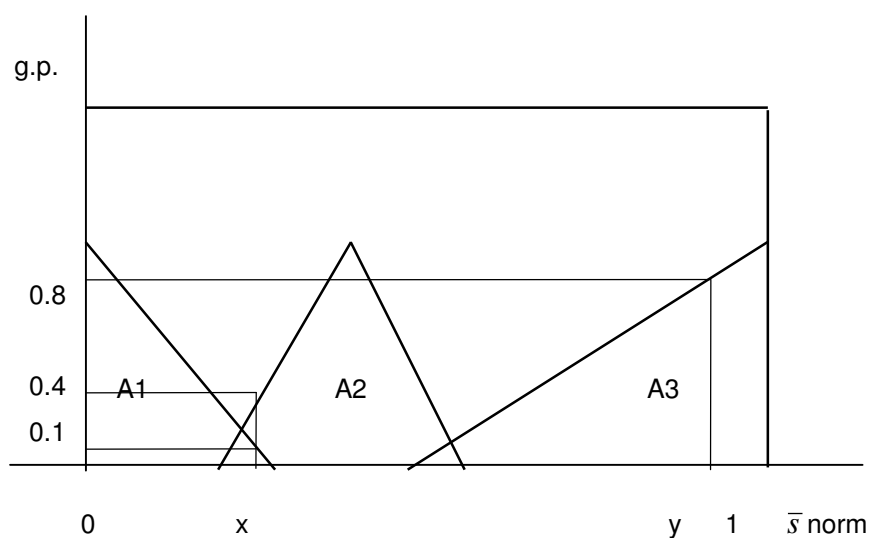
A3 - situação sísmica preocupante - $[centro + 0.05, 1]$.

O valor da variável *centro* deve ser obtido por calibração (conforme se refere em 5.2.1), utilizando-se para o efeito várias **Condições Iniciais reais** (constantes do catálogo (Sousa, Martins e Oliveira, 1992)). Os valores numéricos intervenientes nesta classificação de cenários sísmicos (0.1 e 0.05) resultaram de um processo de experimentação empírica, com vista a garantir, a sobreposição adequada dos conjuntos vagos A1 e A2, bem como A2 e A3.

Não existe uma forma típica para a função pertença nos Conjuntos Vagos, no entanto as mais comuns são as funções triangulares, trapezoidais e a função em forma de sino.

Com vista à concepção do Sistema de Controlo Vago, adoptou-se a função pertença de tipo triangular que, entre outras vantagens, tal como refere Kosko (Kosko, 1994), torna mais fácil a operação de adição entre conjuntos vagos.

A figura 5.2.2 apresenta **um exemplo** de função pertença triangular. Neste caso concreto, um valor de \bar{s}_{norm} igual a x ($0 \leq x \leq 1$) pertence a A1 com **grau de pertença de 0.1**, a A2 com **grau de pertença de 0.4** e a A3 com **grau de pertença de 0**. Um valor de \bar{s}_{norm} igual a y ($0 \leq y \leq 1$) pertence a A1 e A2 com grau de pertença de 0 e a A3 com grau de pertença de 0.8.



Nota: g.p. designa grau de pertença

Figura 5.2.2 - Exemplo de representação gráfica da função pertença de um conjunto vago

A **variável de saída** - B é o grau de alarme associado ao precursor Condições Iniciais. Esta variável tem como domínio de variação o intervalo real $[0,100]$ e podem definir-se 3 conjuntos vagos associados às classificações de graus de alarme:

B1 - ausência de alarme ou vigilância - $ga_{CI} \in [0, 40]$;

B2 - vigilância - $ga_{CI} \in [30, 70]$;

B3 - alarme - $ga_{CI} \in [60, 100]$.

A função pertença destes conjuntos vagos, também de forma triangular, tem a seguinte representação gráfica:

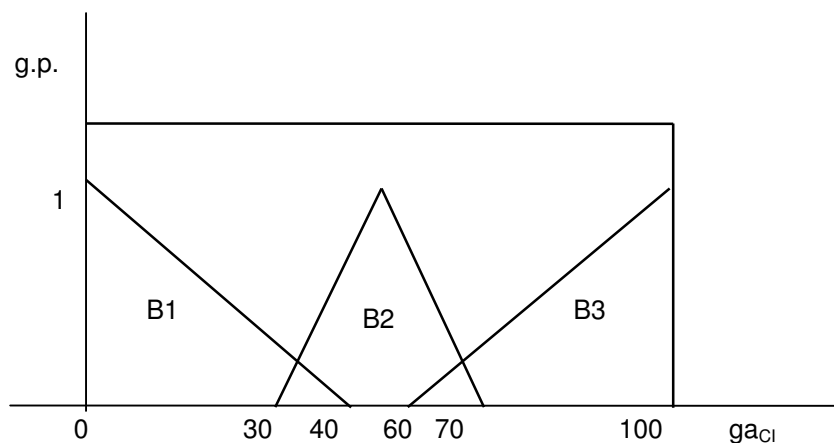


Figura 5.2.3 - Representação gráfica da função pertença dos conjuntos vagos associados a ga_{CI}

O Sistema de Controlo Vago fica completo com a definição das regras lógicas que a cada valor de entrada façam corresponder um valor de saída. No sistema que se vem apresentando, foram definidas as três regras seguintes:

R1: Se a situação sísmica é **normal**, então não é necessário **nem alarme nem vigilância**

$$A1 \Rightarrow B1;$$

R2: Se a situação sísmica é **moderadamente preocupante**, então deve haver **vigilância**

$$A2 \Rightarrow B2 \quad e$$

R3: Se a situação sísmica é **preocupante**, então deve ser accionado o sistema de **alarme sísmico**

$$A3 \Rightarrow B3.$$

Note-se que um valor de entrada, pode accionar várias regras em simultâneo, cada uma delas com um certo grau de activação. Por exemplo, o valor de entrada **x**, no exemplo anteriormente apresentado, acciona a regra R1 a 10%, a regra R2 a 40% e a regra R3 a 0%. Desta forma, em geral, todas as regras são accionadas, em simultâneo, ainda que com diferentes graus.

Na hipótese acabada de referir o valor de saída do sistema depende 10% da regra R1, 40% da regra R2 e 0% da regra R3, obtendo-se assim dois conjuntos vagos de saída (já que a regra R3 é activada a 0%): **ausência de alarme/vigilância** e **vigilância**. Como estes conjuntos resultam de regras que não estão a funcionar a 100%, então a suas funções pertença devem traduzir esse facto.

Kosko (Kosko, 1994) propõe uma forma de “reduzir” as funções pertença, que consiste em “multiplicá-las” pelo grau de activação das regras que as originaram. No caso de funções pertença de forma triangular, a “redução” é obtida “multiplicando-se” a altura do triângulo pelo grau de activação da respectiva regra.

Como se adoptaram funções pertença de forma triangular, a altura do triângulo passa a ter como valor o grau de activação da respectiva regra.

No exemplo anterior, a altura do triângulo que representa a função pertença do conjunto vago **ausência de alarme/vigilância** passa a ser 0.10, e a altura do triângulo que representa a função pertença do conjunto vago **vigilância** passa a valer 0.40.

Os dois triângulos sobrepostos são agregados de forma a produzirem um **único Conjunto Vago de saída**. Esta agregação é feita adicionando (adição normal de funções) as funções pertença.

Mas o que se pretende é um valor de saída numérico (entre 0 e 100), que representará o grau de alarme relativamente ao precursor Condições Iniciais.

A nova função pertença que, neste exemplo, é a soma das duas funções de forma triangular, vai ser substituída pelo seu “centro de massa”. Este processo de substituir um conjunto vago por um valor numérico (“*rígido*”), referido na terminologia anglo-saxónica por “defuzzification”, pode ser interpretado como o processo de tornar rígido o Conjunto Vago de saída.

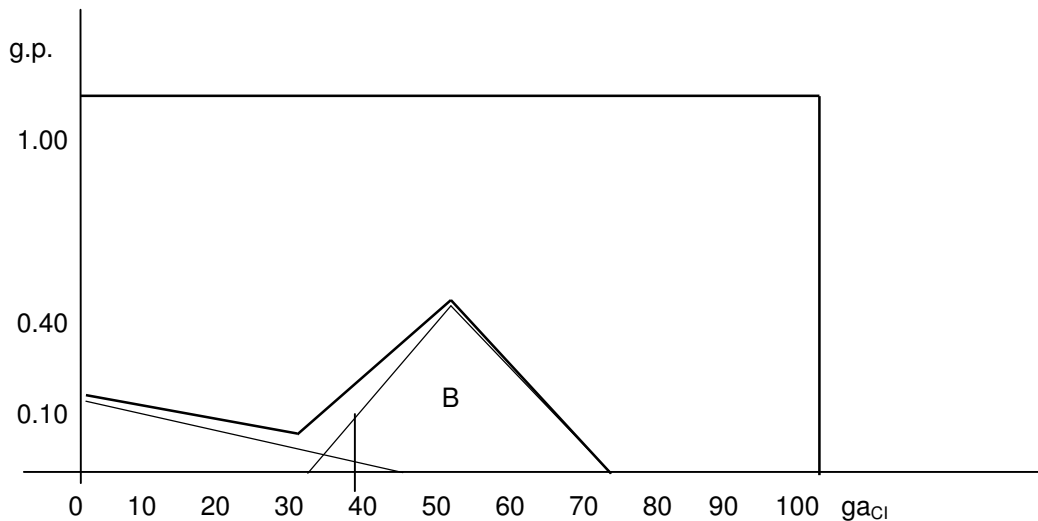


Figura 5.2.4 - Conjunto vago de saída

O “*centro de massa*” da função pertença determina-se, por integração numérica, sendo definido como o ponto do eixo das abcissas onde se atinge metade da área delimitada pelos eixos cartesianos e o conjunto vago de output, ficando desta forma determinado o **grau de alarme correspondente a uma dada condição inicial**.

O Sistema de Controlo Vago concebido pode assim esquematizar-se na figura seguinte:

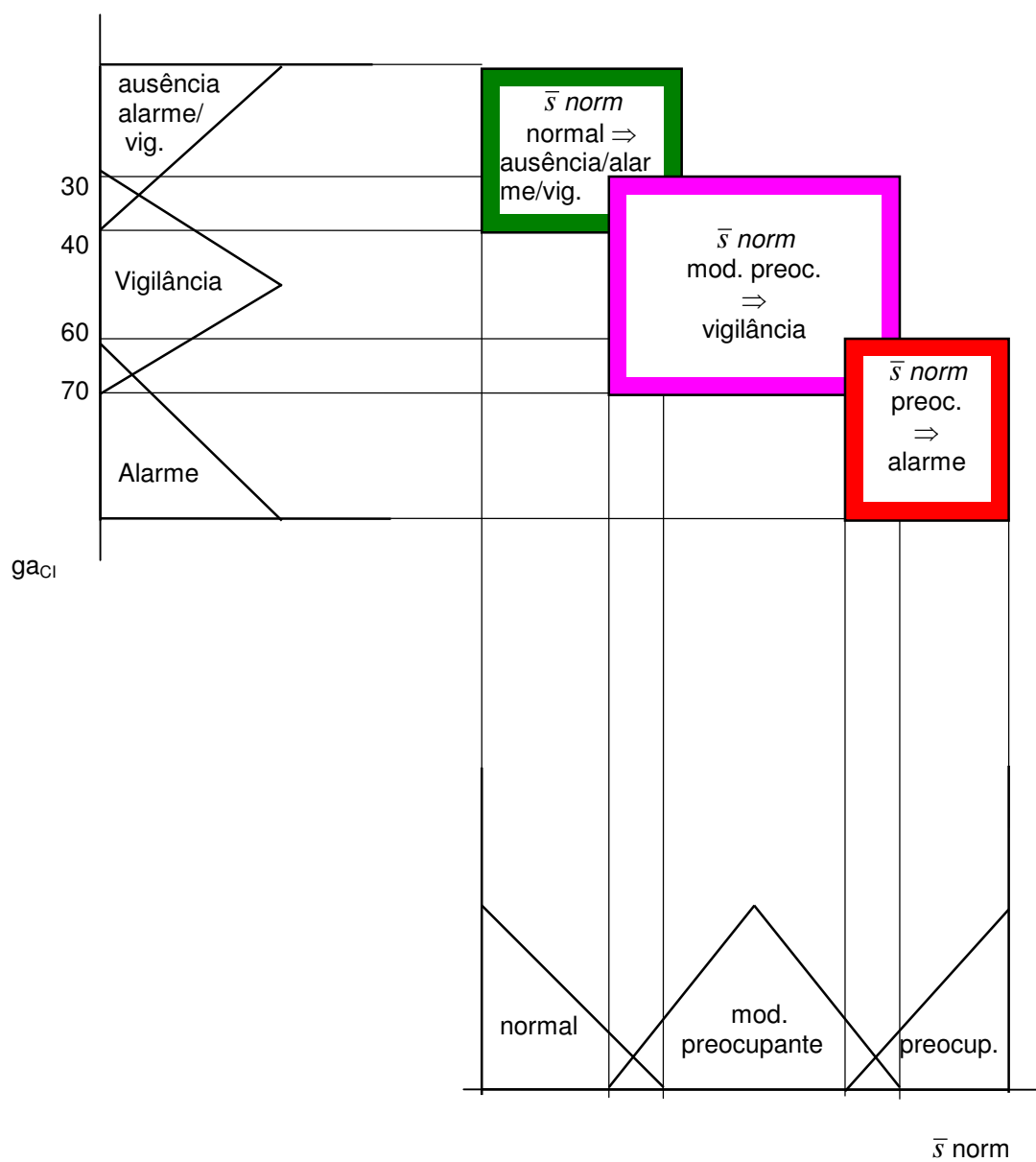


Figura 5.2.5 - Representação esquemática do Sistema de Controlo Vago para as Condições Iniciais

5.2.1 - Experiências efectuadas

Uma vez apresentada a metodologia que, dada uma *condição inicial* permite determinar o grau de alarme que lhe está associado, reveste-se de especial interesse a determinação do grau de alarme para várias *condições iniciais*, umas fictícias e outras reais (ou seja, que se verificaram no processo de ocorrências sísmicas, e consequentemente, fazem parte do catálogo sísmico utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992).

Estudaram-se duas regiões sísmicas:

- **Lisboa** (a que correspondem a *zonas sísmicas* números 1 e 7) e
- **Andaluzia** (a que correspondem a *zonas sísmicas* números 2 e 3),

dois **períodos de tempo: 7 e 15 dias**, e consideraram-se as ocorrências de **magnitude maior ou igual a 4.0**.

Determinou-se o intervalo [Li, Ls] para os dois horizontes temporais e as duas regiões estudadas.

Os valores que se apresentam no quadro 5.2.1.1 foram determinados com base em 10000 simulações do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, em que se contabilizaram as ocorrências com magnitude superior ou igual a 4.0 durante períodos de 7 e 15 dias.

	Lisboa		Andaluzia	
	7 dias	15 dias	7 dias	15 dias
\bar{s} min	0.0074	0.0247	0.0367	0.1278
s_s min	0.0903	0.1622	0.2213	0.4196
\bar{s} max	0.1044	0.1345	0.3850	0.5251
s_s max	0.3260	0.3729	0.6671	0.8055
$Li = \bar{s} \text{ min} - 2.5758 \times s_s \text{ min} / \sqrt{n}$	0.0051	0.0205	0.0310	0.1170
$Ls = \bar{s} \text{ max} + 2.5758 \times s_s \text{ max} / \sqrt{n}$	0.1128	0.1441	0.4022	0.5458

Nota: s_s designa o Desvio Padrão de s

Quadro 5.2.1.1 - Determinação do intervalo [Li, Ls] para as regiões de Lisboa e Andaluzia, para horizontes temporais de 7 e 15 dias

Como já foi referido é necessário determinar o valor de *centro*. O seu valor deve ser obtido por calibração e, deve ser tal que torne verosímeis os resultados obtidos, ou seja, quando se

determinar o grau de alarme associado a *condições iniciais* reais que precederam sismos de forte magnitude, o valor do grau de alarme obtido deve corresponder a uma **situação de alarme**, ou quando muito a uma **situação de vigilância**. De igual modo, quando se determinar o grau de alarme associado a *condições iniciais* reais que não precederam sismos, ou precederam sismos de fraca magnitude, o valor do grau de alarme obtido deve corresponder a uma **situação de ausência de alarme/vigilância**, ou no máximo, a uma **situação de vigilância**.

5.2.1.1 - Experiências com *Condições iniciais* reais

Para determinar o valor adequado do *centro* utilizaram-se 12 *condições iniciais* reais, que ocorreram na Península Ibérica entre 1900 e 1992. Quatro destas *condições iniciais* precederam **sismos de fraca magnitude** (magnitude entre 3.0 e 4.0) e oito precederam **sismos de forte magnitude** (magnitude superior ou igual a 5.0).

Nos quadros 5.2.1.1.1 e 5.2.1.1.2 as *condições iniciais* números 1 e 2 precederam sismos de fraca magnitude e as *condições iniciais* números 3 a 6 precederam sismos de forte magnitude.

Note-se que na região de Lisboa, entre 1900 e 1992 o catálogo utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) apenas possui 4 registos de ocorrências de magnitude superior ou igual a 5.0 com informação relativa a $D_{t_{i-2}}$, $D_{t_{i-1}}$, G_{i-2} , G_{i-1} e E_{i-1} , não sendo assim possível, nesta região, efectuar mais do que 4 experiências reais deste tipo.

Exp. nº	Data	G i	E i	Dt		G		E
				i-2	i-1	i-2	i-1	i-1
1	1988.6680478	1.90	7	0.0013293	0.0036628	2.6	2.9	3
2	1916.6306371	2.28	1	0.0348360	0.0376271	4.09	3.72	16
3	1914.7264060	5.37	7	0.0119019	0.1171474	4.93	4.70	4
4	1941.2822584	5.22	7	0.0010589	0.0260929	4.20	3.62	16
5	1913.5986658	6.25	1	0.0025114	0.0005969	4.94	3.48	16
6	1978.2638885	5.10	1	0.0096571	0.0280872	4.30	3.90	3

Quadro 5.2.1.1.1 - *Condições iniciais* reais experimentadas para a região de Lisboa

Exp. nº	Data	G i	E i	Dt		G		E i-1
				i-2	i-1	i-2	i-1	
1	1953.2834951	2.74	2	0.0216391	0.0151964	4.56	3.98	16
2	1991.2582397	2.9	3	0.0080164	0.0089478	2.8	3.5	4
3	1953.3443953	5.39	2	0.0028980	0.0000309	3.83	3.6	2
4	1975.5990304	5.20	3	0.0104650	0.0043332	3.46	3.6	9
5	1956.3068978	5.15	3	0.0001817	0.0000114	3.21	2.9	3
6	1984.6999738	5.00	3	0.0030389	0.0016706	2.5	4.1	2

Quadro 5.2.1.1.2 - Condições iniciais reais experimentadas para a região da Andaluzia

Para cada *condição inicial* efectuaram-se 10000 simulações do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, durante períodos de 7 e 15 dias, tendo-se determinado, para ambas as regiões estudadas, o número médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% do número médio de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4.0.

Os quadros 5.2.1.1.3 e 5.2.1.1.4 sintetizam os resultados obtidos.

Cl. nº	Lisboa			Andaluzia		
	\bar{s}	s_s	I.C. a 95% para \bar{s}	\bar{s}	s_s	I.C. a 95% para \bar{s}
1	0.0300	0.1821	0.0264 - 0.0336	0.1368	0.3984	0.1290 - 0.1446
2	0.0200	0.1414	0.0172 - 0.0228	0.1293	0.4039	0.1214 - 0.1372
3	0.0430	0.2060	0.0390 - 0.0470	0.2780	0.5793	0.2666 - 0.2894
4	0.0254	0.2893	0.0197 - 0.0311	0.2261	0.5105	0.2161 - 0.2361
5	0.0450	0.2213	0.0407 - 0.0493	0.1853	0.4759	0.1760 - 0.1946
6	0.0255	0.1565	0.0224 - 0.0286	0.2448	0.5434	0.2341 - 0.2555

Quadro 5.2.1.1.3 - Resultados obtidos para as condições iniciais reais experimentadas para a região de Lisboa e da Andaluzia, para T0 = 7 dias

Cl. nº	Lisboa			Andaluzia		
	\bar{s}	s_s	I.C. a 95% para \bar{s}	\bar{s}	s_s	I.C. a 95% para \bar{s}
1	0.0704	0.2692	0.0651 - 0.0757	0.2184	0.5373	0.2079 - 0.2289
2	0.0437	0.2112	0.0396 - 0.0478	0.2741	0.5776	0.2628 - 0.2854
3	0.0728	0.2752	0.0674 - 0.0782	0.4270	0.7334	0.4126 - 0.4414
4	0.0516	0.2992	0.0471 - 0.0561	0.3952	0.6908	0.3817 - 0.4087
5	0.0804	0.2992	0.0745 - 0.0863	0.3325	0.6473	0.3198 - 0.3452
6	0.0398	0.2006	0.0356 - 0.0437	0.4027	0.6994	0.3890 - 0.4164

Quadro 5.2.1.1.4 - Resultados obtidos para as condições iniciais reais experimentadas para a região de Lisboa e da Andaluzia, para T0 = 15 dias

Os valores obtidos foram normalizados, conforme se explicou em 5.2, obtendo-se os valores apresentados no quadro 5.2.1.1.5.

Cl. nº	Lisboa				Andaluzia			
	7 dias		15 dias		7 dias		15 dias	
	\bar{s}	\bar{s} norm	\bar{s}	\bar{s} norm	\bar{s}	\bar{s} norm	\bar{s}	\bar{s} norm
1	0.0300	0.2312	0.0704	0.4037	0.1368	0.2850	0.2184	0.2365
2	0.0200	0.1383	0.0437	0.1877	0.1293	0.2648	0.2741	0.3664
3	0.0430	0.3519	0.0728	0.4231	0.1007	0.1874	0.4270	0.7229
4	0.0254	0.1885	0.0516	0.2516	0.2261	0.5256	0.3952	0.6488
5	0.0450	0.3705	0.0804	0.4846	0.2448	0.5760	0.3325	0.5026
6	0.0255	0.1894	0.0398	0.1561	0.1853	0.4157	0.4027	0.6663

Quadro 5.2.1.1.5 - Valores obtidos de \bar{s} e \bar{s} norm

Para se determinar o valor de *centro* mais adequado, estabeleceu-se um sistema de pontuação, tal que, quanto melhor ga_{CI} se adapte a situação real, maior seja a pontuação obtida.

No quadro 5.2.1.1.6 apresenta-se o sistema de pontuação utilizado.

	Conjuntos Vagos associados a ga_{CI}		
	B1	nem B1 nem B2	B2
condições que precederam sismos de fraca magnitude	1	2	-2
condições que precederam sismos de forte magnitude	-2	0	2

Quadro 5.2.1.1.6 - Sistema de pontuação utilizado para a calibração da variável *centro*, para o precursor Condições Iniciais

As *condições iniciais* números 1 e 2 precederam sismos de **fraca magnitude**, pelo que é desejável que para estes casos ga_{CI} corresponda a uma situação de **vigilância** ou até **de ausência de alarme/vigilância**. Com efeito, intuitivamente pode considerar-se que a estes sismos deve estar associada uma situação de vigilância, mas, se se for menos exigente, pode também considerar-se correcta uma situação de ausência de alarme/vigilância. No entanto, considera-se preferível que a situação seja de vigilância, pelo que para este caso se atribuiu uma pontuação de 2 pontos, ao passo que para a situação de ausência de alarme/vigilância se atribuiu apenas 1 ponto. Se, no entanto, o valor de ga_{CI} indicar tratar-se de uma situação de alarme, o resultado é manifestamente inadequado, atribuindo-se-lhe a pontuação de -2.

Por outro lado, as *condições iniciais* números 3 a 6 precederam sismos de **forte magnitude**, pelo que é desejável que para estes casos ga_{CI} corresponda a uma situação de **alarme**, ou quando muito de **vigilância**. No entanto, para estas *condições iniciais* deve haver maior diferença no valor de pontuação para os valores de ga_{CI} associados a situações de vigilância e de alarme. Com efeito, estas *condições iniciais* precederam sismos fortes, pelo que uma situação de vigilância, embora não devendo ser considerada incorrecta, é certamente menos adequada do que uma situação de ausência de alarme/vigilância para *condições iniciais* que precederam sismos de fraca magnitude. À situação de alarme foi atribuída uma pontuação de 2 e à situação de vigilância uma pontuação de 0. A situação de ausência de alarme/vigilância recebeu uma pontuação de -2.

Com vista à escolha do mais adequado valor de *centro*, determinou-se para cada *condição inicial* ga_{CI} bem como a pontuação correspondente, para vários valores de *centro*. Foram testados os seguintes valores para o *centro*: 0.1, 0.2 e 0.3. Para a região da Andaluzia experimentou-se ainda o valor de *centro* de 0.4 para horizontes temporais de 15 dias.

C.I. nº	Lisboa			Andaluzia		
	centro=0.1	centro=0.2	centro=0.3	centro=0.1	centro=0.2	centro=0.3
1	87.5	49.9	47.2	87.8	53.0	49.9
2	49.9	47.7	11.5	87.7	50.4	49.9
3	87.9	87.7	49.9	53.3	49.9	11.4
4	53.8	49.9	11.4	88.1	88.0	88.0
5	88.0	87.8	50.9	88.1	88.1	88.0
6	54.3	49.9	11.4	88.0	87.9	87.5

Quadro 5.2.1.1.7 - Valores de ga_{CI} para os três valores do *centro* experimentados, para $T_0 = 7$ dias

C.I. nº	Lisboa			Andaluzia		
	centro=0.1	centro=0.2	centro=0.3	centro=0.1	centro=0.2	centro=0.3
1	-2	2	2	-2	2	2
2	2	2	1	-2	2	2
3	2	2	0	0	0	-2
4	0	0	-2	2	2	2
5	2	2	0	2	2	2
6	0	2	-2	2	2	2
total	4	10	-1	2	10	8

Quadro 5.2.1.1.8 - Valores de pontuação para os três valores do *centro* experimentados, para $T_0 = 7$ dias

Verifica-se que, para $T_0 = 7$ dias a melhor escolha corresponde a 0.2, para ambas as regiões estudadas.

C.I. nº	Lisboa			Andaluzia			
	centro=0.1	centro=0.2	centro=0.3	centro=0.1	centro=0.2	centro=0.3	centro=0.4
1	88.0	87.9	87.4	87.5	49.9	48.3	11.4
2	53.5	49.9	11.4	88.0	87.8	50.6	49.9
3	88.0	87.9	87.6	88.1	88.1	88.1	88.1
4	87.6	49.9	49.9	88.1	88.1	88.1	88.0
5	88.2	88.0	87.9	88.1	88.0	87.9	87.5
6	50.0	49.9	11.5	88.1	88.1	88.1	88.1

Quadro 5.2.1.1.9 - Valores de ga_{CI} para os três valores do *centro* experimentados, para $T_0 = 15$ dias

C.I. nº	Lisboa			Andaluzia			
	centro=0.1	centro=0.2	centro=0.3	centro=0.1	centro=0.2	centro=0.3	centro=0.4
1	-2	-2	-2	-2	2	2	1
2	2	2	1	-2	-2	2	2
3	2	2	2	2	2	2	2
4	2	0	0	2	2	2	2
5	2	2	2	2	2	2	2
6	0	0	-2	2	2	2	2
	6	4	1	4	8	12	11

Quadro 5.2.1.1.10 - Valores de pontuação para os três valores do *centro* experimentados, para $T_0 = 15$ dias

A melhor escolha corresponde agora a 0.1, para a região de Lisboa e 0.3 para a região da Andaluzia.

Na figura 5.2.1.1.1 apresenta-se, a título de exemplo, a representação gráfica da função pertença dos Conjuntos Vagos associados às *condições iniciais*, para as regiões de Lisboa e da Andaluzia, para períodos de tempo de 7 dias.

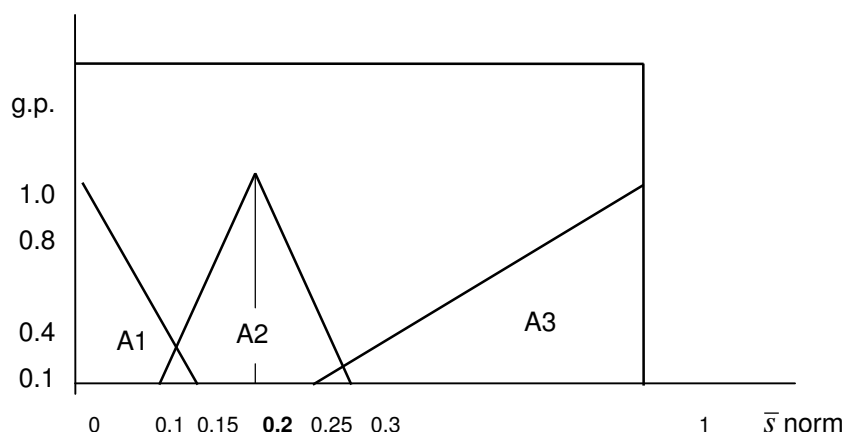


Figura 5.2.1.1.1 - Representação gráfica da função pertinência dos conjuntos vagos associados às condições iniciais para a região de Lisboa, para horizontes temporais de 7 e 15 dias

O Sistema de Controlo Vago apresentado (representado na figura 5.2.15) pode agora ser concretizado para cada par “região/horizonte temporal”.

Os quadros 5.2.1.1.11 e 5.2.1.1.12 apresentam o grau de alarme para as condições iniciais reais experimentadas, bem como o grau de activação, em percentagem, de cada uma das regras R1, R2 e R3, obtidas por aplicação do(s) correspondente(s) Sistema(s) de Controlo Vago.

Região de Lisboa

T0	C.I. nº	\bar{s}	\bar{s} norm	1ª regra	2ª regra	3ª regra	ga _{Cl}
7 dias	1	0.0300	0.2312	0	68.8	0	49.9
	2	0.0200	0.1383	7.8	38.3	0	47.7
	3	0.0430	0.3519	0	0	13.6	87.7
	4	0.0254	0.1885	0	88.5	0	49.9
	5	0.0450	0.3705	0	0	16.1	87.8
	6	0.0255	0.1894	0	89.4	0	49.9
15 dias	1	0.0704	0.4037	0	0	29.8	88.0
	2	0.0437	0.1877	0	12.3	4.4	53.5
	3	0.0728	0.4231	0	0	32.1	88.0
	4	0.0516	0.2516	0	0	12.0	87.6
	5	0.0804	0.4846	0	0	39.4	88.1
	6	0.0398	0.1561	0	43.9	0.7	50.0

Quadro 5.2.1.1.11 - Grau de alarme para as condições iniciais reais experimentadas para a região de Lisboa, para períodos de 7 e 15 dias, bem como o grau de activação (em %) de cada uma das regras R1, R2 e R3

Região da Andaluzia

T0	C.I. nº	\bar{s}	\bar{s} norm	1ª regra	2ª regra	3ª regra	ga _{CI}
7 dias	1	0.1368	0.2850	0	15.0	4.7	53.0
	2	0.1293	0.2648	0	35.2	2.0	50.4
	3	0.1007	0.1874	0	87.4	0	49.9
	4	0.2261	0.5256	0	0	36.7	88.0
	5	0.2448	0.5760	0	44.0	0.8	88.1
	6	0.1853	0.4157	0	0	22.1	87.9
15 dias	1	0.2184	0.2365	5.4	36.5	0	48.3
	2	0.2741	0.3664	0	33.6	2.5	50.6
	3	0.4270	0.7229	0	0	57.4	88.1
	4	0.3952	0.6488	0	0	46.0	88.1
	5	0.3325	0.5026	0	0	23.5	87.9
	6	0.4027	0.6663	0	0	48.7	88.1

Quadro 5.2.1.1.12 - Grau de alarme para as *condições iniciais* reais experimentadas para a região da Andaluzia, para períodos de 7 e 15 dias, bem como o grau de activação (em %) de cada uma das regras R1, R2 e R3

Os quadros 5.2.1.1.11 e 5.2.1.1.12 correspondem aos valores de *centro* mais *adequados*, associados a cada par “região/horizonte temporal”. No entanto, é bom realçar que ainda que sejam *mais adequados*, não são *perfeitos*.

Como se pode observar, há “situações de sucesso” (por exemplo a *condição inicial* número 5, associada a um sismo de forte magnitude dá origem a um elevado grau de alarme - aproximadamente 88), mas também de “insucesso” (por exemplo a situação número 3 para a região de Lisboa e T0 = 7 dias, estando associada a um sismo de forte magnitude origina um moderado grau de alarme).

5.2.1.2 - Experiências com *Condições Iniciais fictícias*

5.2.1.2.1 - Caracterização de cenários sísmicos fictícios

Com vista a uma maior experimentação do Sistema de Controlo Vago proposto, utilizaram-se também *condições iniciais fictícias*, cujos valores foram gerados aleatoriamente, de forma análoga ao que foi feito em 3.3, adoptando-se os valores de *centro* determinados em 5.2.1.1.

Dado que em 3.2 e 3.3, ao estudar-se os factores D_t e G se atribuíram valores análogos a ambos os seus parâmetros ($D_{t_{i-2}}$, $D_{t_{i-1}}$, G_{i-2} , G_{i-1}), considerou-se interessante efectuar agora o estudo de cenários em que os dois parâmetros de um factor tivessem valores consideravelmente diferentes.

Estudaram-se 10 cenários sísmicos, conforme se esquematiza no quadro 5.2.1.2.1.1, em que as letras: 'a', 'b' e 'm' têm, para os factores D_t e G , o seguinte significado:

b - valor reduzido (**baixo**) do parâmetro em causa, mais precisamente, valor inferior ao percentil 40% da sua distribuição empírica;

a - valor elevado (**alto**) do parâmetro em causa, mais precisamente, valor superior ao percentil 60% da sua distribuição empírica;

m - valor próximo do valor **médio** do parâmetro em causa, mais precisamente, valor compreendido entre o percentil 40% e 60% da sua distribuição empírica.

Relativamente ao factor E , espaço, e por não haver uma relação de ordem no processo de numeração das *zonas sísmicas* utilizadas por Costa (Costa, 1989), não faz sentido considerar percentis da correspondente distribuição empírica.

No entanto, pode fazer-se uma avaliação da *Sismicidade Local* contabilizando o número de ocorrências em cada *zona sísmica* e hierarquizando-as em função desse número.

zona nº	nº ocorrências	zona nº	nº ocorrências	sismicidade local
1	142	19	24	b
2	833	17	130	b
3	1268	1	142	b
4	797	21	185	b
5	287	8	194	b
6	476	9	202	b
7	240	13	207	b
8	194	20	217	m
9	202	11	222	m
10	237	10	237	m
11	222	7	240	m
12	362	15	279	m
13	207	5	287	m
14	552	12	362	a
15	279	6	476	a
16	624	14	552	a
17	130	16	624	a
19	24	4	797	a
20	217	2	833	a
21	185	3	1268	a

Nota: b - baixo; m - médio ; a - alto

Quadro 5.2.1.2.1.1 - Número de ocorrências em cada *zona sísmica* da Península Ibérica

Desta forma, se E_{i-1} apresentar um valor “baixo”, isso significa que poderá ter o valor de uma das *zonas sísmicas* números: 1, 8, 9, 13, 17, 19 e 21.

Da mesma forma se E_{i-1} tiver um valor “médio”, tal significa que poderá ter o valor de uma das *zonas sísmicas* números: 5, 7, 10, 11, 15 e 20.

Por último, se E_{i-1} tiver um valor “alto”, tal significa que poderá ter o valor de uma das *zonas sísmicas* números: 2, 3, 4, 6, 12, 14, 16.

Levar-se-á a cabo um conjunto de 10 experiências com *condições iniciais* geradas aleatoriamente, de acordo com as especificações do quadro 5.2.1.2.1.2.

Exp. nº	Dt		G		E i-1
	i-2	i-1	i-2	i-1	
1	b	b	m	m	m
2	b	a	m	m	m
3	a	b	m	m	m
4	a	a	m	m	m
5	m	m	b	b	m
6	m	m	b	a	m
7	m	m	a	b	m
8	m	m	a	a	m
9	m	m	m	m	b
10	m	m	m	m	a

Quadro 5.2.1.2.1.2- Cenários sísmicos estudados

Para cada um dos cenários sísmicos referidos, efectuaram-se 10000 simulações do processo de ocorrências sísmicas, tendo-se contabilizado o número de ocorrências de magnitude maior ou igual a 4.0.

Os quadros 5.2.1.2.1.3 e 5.2.1.2.1.4 apresentam o valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança a 95% do número médio de ocorrências de magnitude superior ou igual a 4, para respectivamente, períodos de 7 e 15 dias.

Finalmente, determinou-se para cada cenário sísmico, o grau de alarme relativamente ao precursor Condições Iniciais - ga_{CI} . Os quadros 5.2.1.2.1.5 e 5.2.1.2.1.6 apresentam, além dos valores de \bar{s} e s_s norm, o grau de activação, em percentagem, de cada uma das regras R1, R2 e R3, e por último, o grau de alarme relativo ao precursor Condições Iniciais.

C.I. nº	Lisboa			Andaluzia		
	\bar{s}	s_s	I.C. a 95% para \bar{s}	\bar{s}	s_s	I.C. a 95% para \bar{s}
1	0.0855	0.2796	0.0900 - 0.0910	0.1377	0.3735	0.1304 - 0.1450
2	0.0312	0.1739	0.0278 - 0.0346	0.0784	0.3060	0.0724 - 0.0844
3	0.0529	0.2238	0.0485 - 0.0573	0.1179	0.3691	0.1107 - 0.1251
4	0.0100	0.0995	0.0090 - 0.0120	0.0830	0.3132	0.0769 - 0.0891
5	0.0236	0.1518	0.0206 - 0.0266	0.0784	0.2688	0.0731 - 0.0837
6	0.0414	0.1992	0.0375 - 0.0453	0.1552	0.3778	0.1478 - 0.1626
7	0.0293	0.1686	0.0260 - 0.0326	0.0892	0.3050	0.0832 - 0.0952
8	0.0472	0.2121	0.0430 - 0.0514	0.1674	0.4037	0.1595 - 0.1753
9	0.0610	0.2393	0.0563 - 0.0657	0.1551	0.4457	0.1464 - 0.1638
10	0.0472	0.2121	0.0430 - 0.0514	0.1299	0.3371	0.1233 - 0.1365

Quadro 5.2.1.2.1.3 - Resultados obtidos para as *condições iniciais* geradas aleatoriamente, para $T_0 = 7$ dias

C.I. nº	Lisboa			Andaluzia		
	\bar{s}	s_s	I.C. a 95% para \bar{s}	\bar{s}	s_s	I.C. a 95% para \bar{s}
1	0.1107	0.3442	0.1040 - 0.1174	0.3159	0.5647	0.3048 - 0.3270
2	0.0637	0.2442	0.0589 - 0.0685	0.1797	0.4361	0.1712 - 0.1882
3	0.0835	0.2766	0.0781 - 0.0889	0.2895	0.5636	0.2785 - 0.3005
4	0.0320	0.1760	0.0286 - 0.0354	0.1855	0.4736	0.1762 - 0.1948
5	0.0561	0.2301	0.0516 - 0.0606	0.2203	0.4716	0.2111 - 0.2295
6	0.0866	0.2812	0.0811 - 0.0921	0.2990	0.5562	0.2881 - 0.3099
7	0.0738	0.2614	0.0687 - 0.0789	0.2284	0.4881	0.2188 - 0.2380
8	0.0747	0.2629	0.0695 - 0.0799	0.3535	0.5932	0.3419 - 0.3651
9	0.0831	0.2760	0.0777 - 0.0885	0.3219	0.5994	0.3102 - 0.3336
10	0.0900	0.3090	0.0839 - 0.0961	0.2748	0.5682	0.2637 - 0.2859

Quadro 5.2.1.2.1.4 - Resultados obtidos para as *condições iniciais* geradas aleatoriamente, para T0 = 15 dias

T0	C.I. nº	\bar{s}	\bar{s} norm	1ª regra	2ª regra	3ª regra	ga _{Cl}
7 dias	1	0.0855	0.7465	0.0	0.0	17.5	87.8
	2	0.0312	0.2423	0.0	57.7	0.0	11.5
	3	0.0529	0.4438	0.0	0.0	8.0	87.3
	4	0.0100	0.0455	69.7	0.0	0.0	11.5
	5	0.0236	0.2869	0.0	13.1	0.0	48.9
	6	0.0414	0.3370	0.0	0.0	11.4	87.6
	7	0.0293	0.2247	0.0	75.3	0.0	49.9
	8	0.0472	0.3909	0.0	0.0	31.0	88.0
	9	0.0610	0.5190	0.0	0.0	19.7	87.9
	10	0.0472	0.3909	0.0	0.0	2.8	50.7
15 dias	1	0.1107	0.7298	0.0	0.0	68.2	88.1
	2	0.0637	0.3495	0.0	0.0	23.5	87.9
	3	0.2895	0.5097	0.0	0.0	42.3	88.1
	4	0.0320	0.0930	0.0	93.0	0.0	49.9
	5	0.0561	0.2880	0.0	0.0	16.2	87.8
	6	0.0866	0.5348	0.0	0.0	45.3	88.1
	7	0.0738	0.4312	0.0	0.0	31.1	88.0
	8	0.0747	0.4385	0.0	0.0	33.9	88.0
	9	0.0831	0.5065	0.0	0.0	41.9	88.1
	10	0.0900	0.5623	0.0	0.0	48.5	88.1

Quadro 5.2.1.2.1.5 - Grau de alarme para as *condições iniciais* arbitradas para a região de Lisboa, para períodos de 7 e 15 dias, bem como o grau de activação (em %) de cada uma das regras R1, R2 e R3

T0	C.I. nº	\bar{s}	\bar{s} norm	1ª regra	2ª regra	3ª regra	ga _{Cl}
7 dias	1	0.1377	0.2874	0.0	12.6	5.0	53.9
	2	0.0784	0.1277	14.9	27.7	0.0	43.3
	3	0.1179	0.2341	0.0	65.9	0.0	49.9
	4	0.0830	0.1401	6.6	40.1	0.0	48.1
	5	0.0784	0.1277	14.9	27.7	0.0	43.3
	6	0.1552	0.3346	0.0	0.0	11.3	87.6
	7	0.0892	0.1568	0.0	56.8	0.0	49.9
	8	0.1674	0.3675	0.0	0.0	15.7	87.8
	9	0.1551	0.3343	0.0	0.0	11.2	87.6
	10	0.1299	0.2664	0.0	33.6	2.2	50.5
15 dias	1	0.3159	0.4639	0.0	0.0	17.5	87.8
	2	0.1797	0.1462	41.5	0.0	0.0	11.5
	3	0.2895	0.4023	0.0	0.0	8.0	87.3
	4	0.1855	0.1597	36.1	0.0	0.0	11.5
	5	0.2203	0.2409	3.6	49.9	0.0	48.9
	6	0.2990	0.4244	0.0	0.0	11.4	87.6
	7	0.2284	0.2598	0.0	59.8	0.0	49.9
	8	0.3535	0.5515	0.0	0.0	31.0	88.0
	9	0.3219	0.4778	0.0	0.0	19.7	87.9
	10	0.2748	0.3680	0.0	32.0	2.8	50.7

Quadro 5.2.1.2.1.6 - Grau de alarme para as *condições iniciais* arbitradas para a região da Andaluzia, para períodos de 7 e 15 dias, bem como o grau de activação (em %) de cada uma das regras R1, R2 e R3

5.2.1.2.2 - Análise de resultados

Para cada um dos 10 cenários sísmicos estudados, verificou-se quantas vezes ocorreram situações de “ausência de alarme/vigilância”, “vigilância” e “alarme”, nas duas regiões e dois períodos de tempo analisados. Registaram-se os resultados no quadro 5.2.1.2.2.1. (Cada • representa uma ocorrência da correspondente situação).

C.I. nº	ausência de alarme/vigilância	vigilância	alarme
1		•	• • •
2	• •	•	•
3		•	• • •
4	•	• • •	
5		• • •	•
6			• • • •
7		• • •	•
8			• • • •
9			• • • •
10		• • •	•

Quadro 5.2.1.2.2.1 - Situações que ocorreram nos 10 cenários sísmicos estudados

Verifica-se que as situações menos preocupantes correspondem aos cenários números 2 e 4, em que, ambos os valores de G_{i-2} e G_{i-1} têm um valor “médio”, o valor de $D_{t_{i-1}}$ é “elevado” e E_{i-1} tem um valor “médio”.

Note-se que nas *condições iniciais* nºs 1 a 4, G_{i-2} e G_{i-1} têm valores “médios”, E_{i-1} tem um valor “médio”, distinguindo-se os quatro cenários nos valores de $D_{t_{i-2}}$ e $D_{t_{i-1}}$. Os dois cenários menos preocupantes encontram-se entre estes.

As situações mais preocupantes correspondem aos cenários sísmicos números 6, 8 e 9. Nestes cenários, registou-se sempre um valor de ga_{CI} correspondente a uma situação de alarme.

Os cenários números 6 e 8 encontram-se entre o conjunto de *condições iniciais* cujos valores de $D_{t_{i-2}}$ e $D_{t_{i-1}}$ são “médios” e E_{i-1} tem um valor “médio”. Nas *condições iniciais* correspondentes ao cenário número 6, G_{i-2} tem um valor “baixo” e G_{i-1} um valor “alto”, ao passo que nas *condições iniciais* correspondentes ao cenário número 8 ambos os valores de G_{i-2} e G_{i-1} têm valores “elevados”. De notar a contribuição de valores elevados de magnitude da(s) última(s) ocorrência(s) para situações de alarme associadas ao precursor Condições Iniciais.

Por último a situação número 9, em que $D_{t_{i-2}}$ e $D_{t_{i-1}}$ são “médios”, G_{i-2} e G_{i-1} também são “médios” e E_{i-1} tem um valor “baixo”, provocou também uma situação de alarme associada ao precursor Condições Iniciais. Tal significa, que se deve dispensar especial atenção a situações em que, tanto $D_{t_{i-2}}$ e $D_{t_{i-1}}$ como G_{i-2} e G_{i-1} têm valores próximos do valor médio das correspondentes distribuições empíricas.

Estudaram-se 10 tipos de *condições iniciais* (ver quadro 5.2.1.2.1.2), cujos valores foram gerados aleatoriamente dentro de certos intervalos. Estes 10 tipos de *condições iniciais* constam essencialmente de três tipos:

1º Grupo - *condições iniciais* nºs 1 a 4, em que G_{i-2} e G_{i-1} têm valores próximos do valor médio da distribuição empírica de G e E_{i-1} tem um valor “médio”. Os quatro cenários distinguem-se pelos valores que D_{t-2} e D_{t-1} podem tomar.

2º Grupo - *condições iniciais* nºs 5 a 8, em que D_{t-2} e D_{t-1} têm valores próximos do valor médio da distribuição empírica de D_t e E_{i-1} tem um valor “médio”. Os quatro cenários distinguem-se pelos valores que G_{i-2} e G_{i-1} podem tomar.

3º Grupo - *condições iniciais* nºs 9 e 10, em que, tanto D_{t-2} e D_{t-1} como G_{i-2} e G_{i-1} têm valores próximos do valor médio das correspondentes distribuições empíricas. Os dois cenários distinguem-se pelos valores que E_{i-1} pode tomar.

Verifica-se que, o menor número de situações de alarme se verificou no 1º Grupo e o maior no 2º e 3º Grupos.

As situações mais preocupantes são aquelas em que a(s) última(s) ocorrência(s) têm valores elevados de magnitude. Merece ainda especial cuidado o cenário sísmico em que, tanto D_{t-2} e D_{t-1} como G_{i-2} e G_{i-1} , têm valores próximos do valor médio das correspondentes distribuições empíricas, podendo inclusive E_{i-1} tomar valores “baixos”.

5.3 - Conclusão

Apresentou-se uma metodologia que permite determinar o grau de alarme do precursor Condições Iniciais - ga_{CI} .

Construiu-se um modelo que, para cada valor de \bar{s} - número médio de ocorrências de magnitude maior ou igual a G_0 , que ocorreram na região X, durante o período de tempo T_0 , sabendo-se que se partiu de um determinado cenário sísmico, faz corresponder um valor de **grau de alarme do precursor Condições Iniciais**.

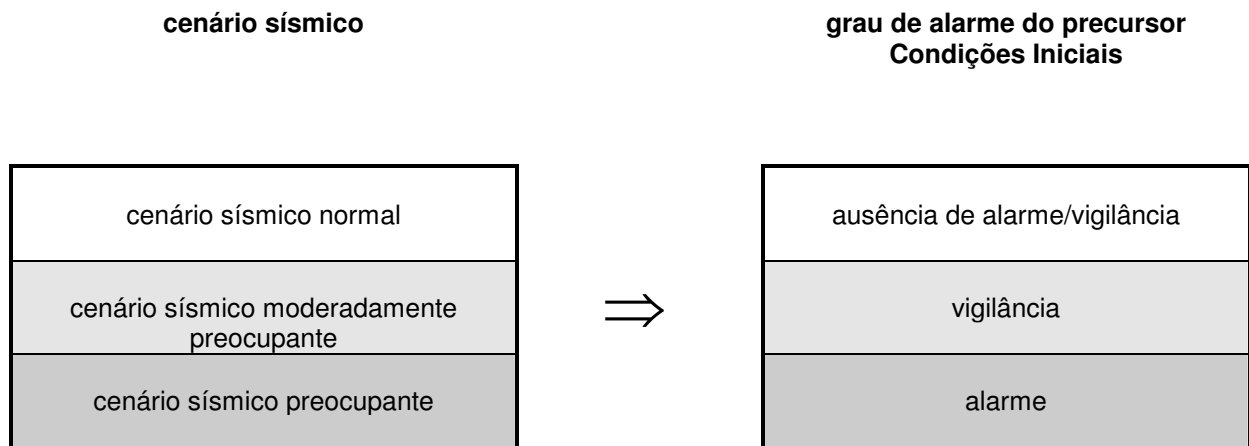


Figura 5.3.1 - Relação de \bar{s} com ga_{CI}

A cada valor de \bar{s} deve ser associado um grau de alarme, de tal modo que, quanto maior for \bar{s} maior seja o grau de alarme.

Utilizou-se a teoria dos **Conjuntos Vagos** para definir conjuntos associados às variáveis \bar{s} e ga_{CI} , bem como regras lógicas que os associem.

Estudaram-se duas regiões sísmicas:

- **Lisboa** (a que correspondem a *zonas sísmicas* números 1 e 7) e
- **Andaluzia** (a que correspondem a *zonas sísmicas* números 2 e 3)

e dois horizontes temporais: 7 e 15 dias, tendo-se considerado apenas os sismos com magnitude Richter maior ou igual a 4.

Efectuaram-se experiências com ***condições iniciais reais*** (que ocorrerem na Península Ibérica e constam do catálogo (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) e ***condições iniciais fictícias*** (cujos valores foram gerados aleatoriamente dentro de certos limites).

Das 12 condições iniciais reais utilizadas, 6 para cada região estudada, 4 precederem sismos de fraca magnitude (valores de magnitude entre 3 e 4) e 8 precederam sismos de forte magnitude (valores de magnitude superior ou igual a 5).

O modelo desenvolvido neste capítulo foi calibrado com base nestas 12 *condições iniciais reais*, e no pressuposto de que:

- *condições iniciais* que precederam *sismos de fraca magnitude* devem produzir situações de *ausência de alarme/vigilância* ou situações de *vigilância*;
- *condições iniciais* que precederam *sismos de forte magnitude* devem produzir situações de *alarme/vigilância* ou situações de *alarme*;

Tanto para as *condições iniciais* reais como para as *condições iniciais fictícias*, efectuaram-se 10000 simulações do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, contabilizando-se as ocorrências de magnitude maior ou igual a 4.

Capítulo 6

GRAU DE ALARME DO PRECURSOR SISMICIDADE LOCAL

6.1 - Introdução

Neste capítulo pretende-se abordar a questão da determinação do **grau de alarme do precursor Sismicidade Local - ga_{SL}** , associado a um dado nível de *Sismicidade Local*.

A cada valor de *Sismicidade Local* (veja-se 4.1), deve associar-se um valor numérico ga_{SL} , entre 0 e 100. De notar que ga_{SL} deverá ser tanto maior quanto maior for a *Sismicidade Local*.

Em 6.2 apresenta-se uma metodologia que permite determinar o grau de alarme associado ao precursor Sismicidade Local. Esta metodologia apresenta semelhanças com a exposta em 5.2, para a determinação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais.

Utilizou-se novamente a Teoria dos Conjuntos Vagos, para definir conjuntos associados aos valores de *Sismicidade Local*.

Estudaram-se duas **regiões sísmicas**:

- **Lisboa** (a que correspondem as *zonas sísmicas* n.ºs 1 e 7) e
- **Andaluzia** (a que correspondem as *zonas sísmicas* n.ºs 2 e 3) e

três **horizontes temporais**: 7, 15 e 30 dias.

O Sistema de Controlo Vago foi calibrado com base em 12 valores reais de *Sismicidade Local* (6 para cada uma das regiões sísmicas estudadas).

6.2 - Grau de alarme associado ao precursor Sismicidade Local

Recorrendo-se novamente à Teoria dos Conjuntos Vagos, define-se agora como **variável de entrada** a *Sismicidade Local*, e como **variável de saída** o grau de alarme associado ao precursor Sismicidade Local.

À semelhança do que foi feito para o precursor Condições Iniciais, é necessário determinar o **domínio de variação provável** para o valor de *Sismicidade Local*, para cada região, durante um período de tempo T0.

Começa-se por determinar o domínio de variação provável para o valor de *Sismicidade Local*, para uma região, durante um período de tempo T0.

Uma escolha possível para este domínio seria o conjunto limitado pelos valores mínimo e máximo, do número de ocorrências registado, para a região em causa e período de tempo T0. Porém, com base nos resultados obtidos a partir do catálogo utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992) verifica-se que, para períodos de 7, 15 e 30 dias, tanto na região de Lisboa como da Andaluzia, a distribuição do número de ocorrências durante T0 é fortemente assimétrica (como se pode constatar, muito expressivamente, no quadro 6.2.1), sendo o número máximo de ocorrências registado muito superior ao correspondente valor médio. Por exemplo, para a região de Lisboa de 1900 a 1992, o valor médio do número de ocorrências de qualquer magnitude (inclusive 0)¹ durante um período de 7 dias é 0.16974, e no entanto o número máximo de ocorrências de qualquer magnitude durante igual período de tempo, na mesma região é de 38. Além disso, o percentil 80% da distribuição empírica do número de ocorrências de qualquer magnitude nesta região, para um horizonte temporal de 7 dias é igual a zero, o que significa que na maior parte dos períodos de 7 dias não se registou qualquer ocorrência sísmica.

	Lisboa			Andaluzia		
	7 dias	15 dias	30 dias	7 dias	15 dias	30 dias
valor médio	0.16974	0.36372	0.72711	0.52221	1.11899	2.23698
desvio padrão	1.07977	2.05182	3.85485	1.22373	2.07274	3.58587
percentil 60%	0	0	0	0	1	2
percentil 80%	0	0	1	0	2	3
mínimo	0	0	0	0	0	0
máximo	38	51	84	38	44	57

Quadro 6.2.1 - Estatísticas no número de ocorrências de qualquer magnitude durante períodos de 7, 15 e 30 dias para as regiões de Lisboa e Andaluzia

¹ No catálogo sísmico utilizado, as ocorrências de magnitude desconhecida figuram como tendo magnitude zero.

Considerou-se então preferível, para horizontes temporais até 30 dias, adoptar um domínio de variação provável da *Sismicidade Local* compreendido entre 0 e 3, admitindo-se que, para valores de *Sismicidade Local* superiores a três, o grau de alarme do precursor Sismicidade Local deveria ser 100 (o seu valor máximo).

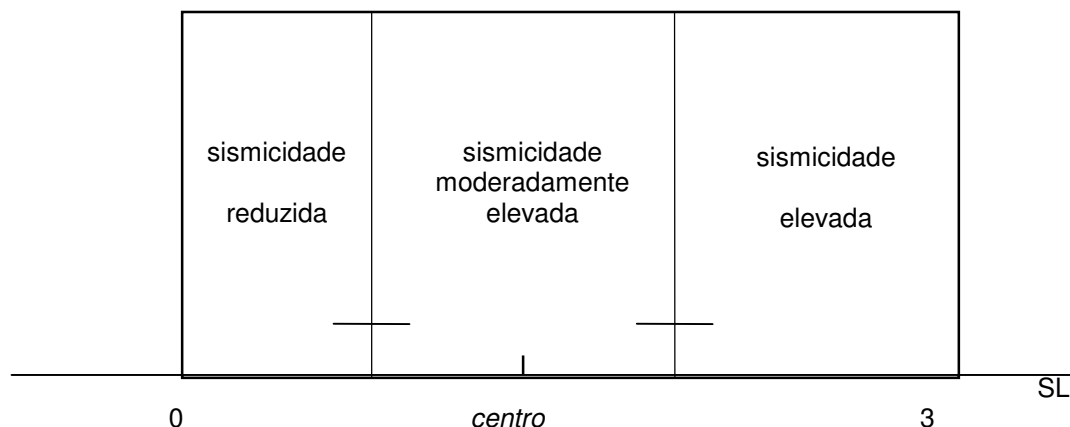


Figura 6.2.1 - Domínio de variação provável da *Sismicidade Local*

No caso de se pretender estudar horizontes temporais maiores, o domínio de variação provável deverá ser aumentado.

Considere-se o Sistema de Controlo Vago em que a **variável de entrada** é número de sismos de qualquer magnitude na região em estudo, durante o período de tempo T_0 , e a **variável de saída** o grau de alarme associado ao precursor Sismicidade Local.

Associada à variável de entrada, A , definem-se três Conjuntos Vagos associados às três classificações de *Sismicidade Local* adoptadas:

A1 - sismicidade reduzida - $[0, \text{centro} - 0.5]$;

A2 - sismicidade moderadamente elevada - $[\text{centro} - 0.7, \text{centro} + 0.7]$ e

A3 - sismicidade elevada - $[\text{centro} + 0.5, 3]$.

À semelhança do procedimento referido em 5.2, variável *centro*, representa a ponto médio do intervalo correspondente ao cenário sísmico “moderadamente preocupante”. O seu valor deve ser obtido por calibração (veja-se 6.2.1), utilizando-se para o efeito vários **valores reais de Sismicidade Local** (obtidos a partir do catálogo (Sousa, Martins e Oliveira, 1992)). Os valores numéricos intervenientes nesta classificação de cenários sísmicos (0.5 e 0.7) foram obtidos de forma empírica.

Tal como para o Precursor Condições Iniciais, adoptou-se funções pertença de forma triangular para os conjuntos vagos A1, A2 e A3.

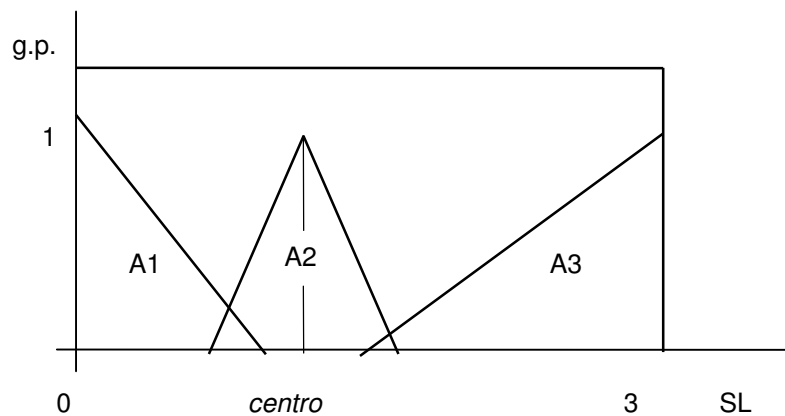


Figura 6.2.2 - Representação gráfica da função pertença dos conjuntos vagos associados à *Sismicidade Local*

A **variável de saída, B**, é associada ao grau de alarme do precursor **Sismicidade Local**. Esta variável tem como domínio de variação o intervalo $[0, 100]$ e podem definir-se 3 conjuntos vagos associados às classificações de graus de alarme:

B1 - ausência de alarme ou vigilância - $ga_{SL} \in [0, 40]$;

B2 - vigilância - $ga_{SL} \in [30, 70]$ e

B3 - alarme - $ga_{SL} \in [60, 100]$.

A função pertença, também de forma triangular, tem a seguinte representação gráfica:

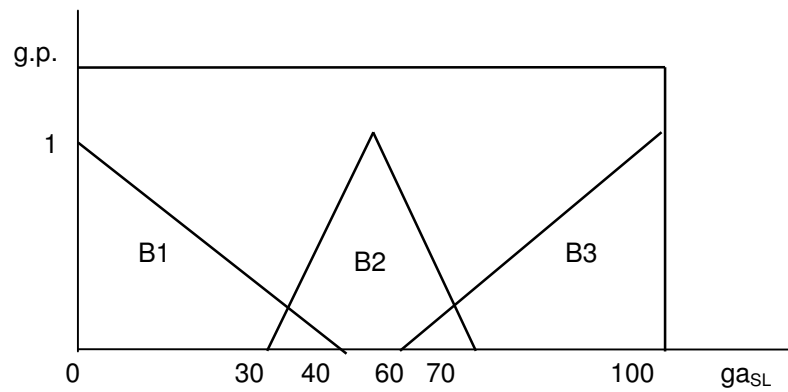


Figura 6.2.3 - Representação gráfica da função pertinência dos conjuntos vagos associados a ga_{SL}

As regras lógicas que, a cada valor de *Sismicidade Local*, associam um grau de alarme (do precursor Sismicidade Local), são as seguintes três regras:

R1: Se a *Sismicidade Local* é **reduzida**, então não é necessário **nem alarme nem vigilância**;

$$A1 \Rightarrow B1$$

R2: Se a *Sismicidade Local* é **moderadamente elevada**, então deve haver **vigilância**

$$A2 \Rightarrow B2 \text{ e}$$

R3: Se a *Sismicidade Local* é **elevada**, então deve ser accionado o sistema de **alarme sísmico**

$$A3 \Rightarrow B3.$$

Tal como no precursor Condições Iniciais, o valor do parâmetro *centro* deve ser tal, que torne verosímeis os resultados obtidos, ou seja, quando se determinar o grau de alarme associado a valores reais de *Sismicidade Local* que precederam sismos de **forte magnitude**, o valor do grau de alarme obtido deve corresponder a uma situação de **alarme** ou quando muito de **vigilância**. De igual modo, quando se determinar o grau de alarme associado a valores reais de *Sismicidade Local* **que não precederam sismos**, ou precederam **sismos de fraca magnitude**, valor do grau de alarme obtido deve corresponder a uma situação de **ausência de alarme/vigilância**, ou a uma situação de **vigilância**.

Para se determinar o valor do parâmetro *centro* mais correcto, estabeleceu-se um sistema de pontuação, idêntico ao utilizado para a calibração do correspondente parâmetro no precursor Condições Iniciais, tal que, quanto melhor ga_{SL} se adapte às situações reais, maior seja a pontuação obtida.

No quadro 6.2.2 apresenta-se o sistema de pontuação utilizado.

	ausência de alarme/vigilância	vigilância	alarme
situações que precederam sismos de fraca magnitude	1	2	-2
situações que precederam sismos de forte magnitude	-2	0	2

Quadro 6.2.2 - Sistema de pontuação utilizado para a calibração da variável *centro*, para o precursor Sismicidade Local

Depois de determinado o valor adequado do parâmetro *centro*, o Sistema de Controlo Vago pode ser concretizado, para cada par “região/horizonte temporal”.

A figura 6.2.4 representa esquematicamente o Sistema de Controlo Vago para o precursor Sismicidade Local.

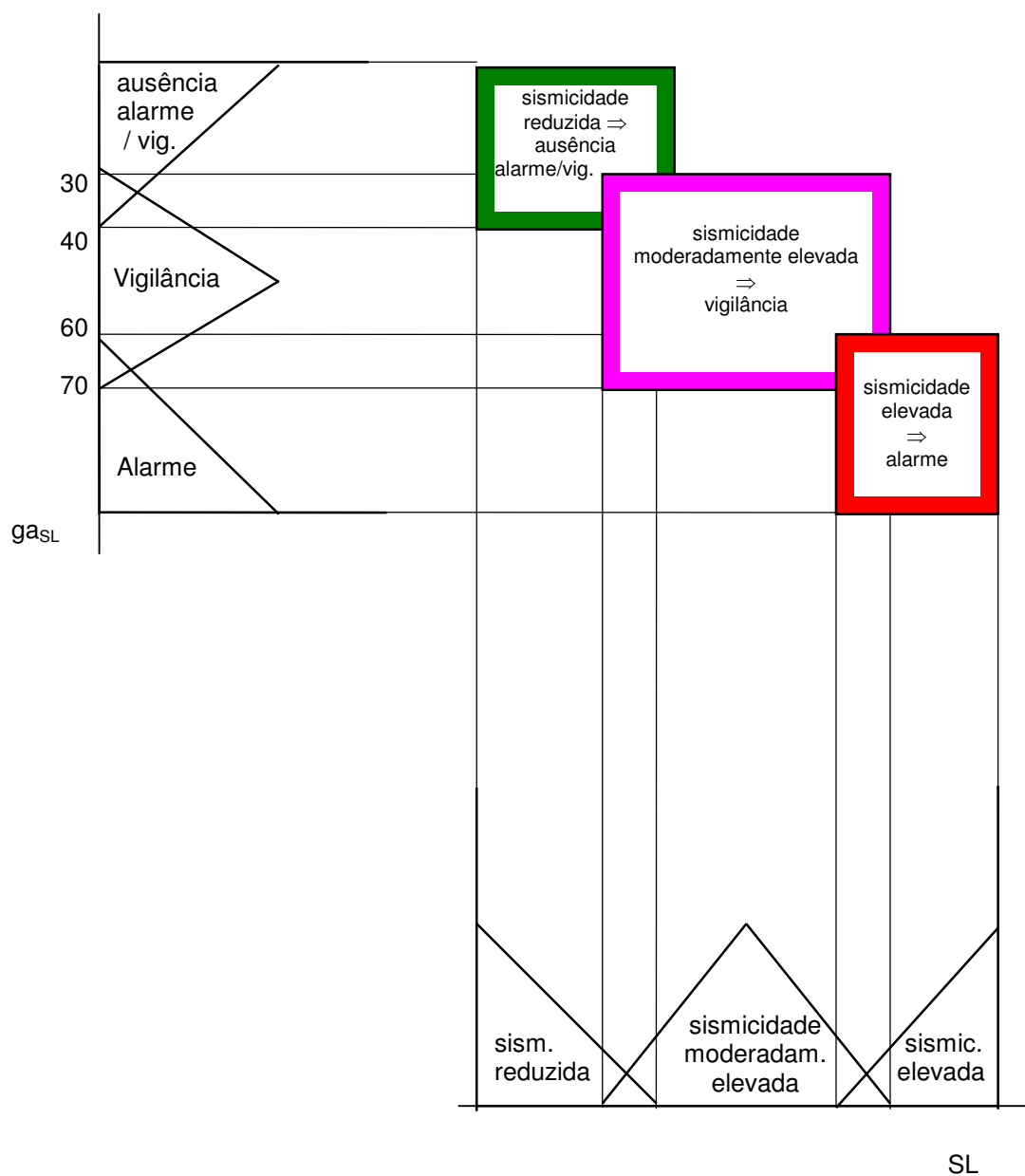


Figura 6.2.4 - Representação esquemática do Sistema de Controlo Vago para o precursor Sismicidade Local.

6.2.1 - Experiências efectuadas

Para determinar o valor adequado do *centro* utilizaram-se as mesmas 12 ocorrências sísmicas que foram utilizadas aquando do estudo do grau de alarme associado ao precursor Condições Iniciais (ver quadros 5.2.1.1.1 e 5.2.1.1.2). Recorde-se que as referidas situações ocorreram na Península Ibérica entre 1900 e 1992, tendo seis delas tido origem na região de Lisboa e outras tantas na região da Andaluzia.

Quatro das referidas situações precederam sismos de fraca magnitude (magnitude entre 3.0 e 4.0) e oito precederam sismos de forte magnitude (magnitude superior ou igual a 5.0).

De recordar que, na região de Lisboa, o catálogo sísmico utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992), apenas possui 4 registos de abalos sísmicos de magnitude superior ou igual a 5.0 e com informação relativa às duas últimas ocorrências (D_{t-2} , D_{t-1} , G_{i-2} , G_{i-1} e E_{i-1}). Este foi o motivo para a utilização de apenas esses 4 registos para a calibração da variável *centro* nos conjuntos vagos associados ao grau de alarme relativo ao precursor Condições Iniciais.

Embora nesta fase não seja necessário conhecer os valores de D_{t-2} , D_{t-1} , G_{i-2} , G_{i-1} e E_{i-1} , tal vai ser necessário para a determinação do grau de alarme total (que inclui o grau de alarme do precursor Condições Iniciais), pelo que se utilizaram apenas as referidas situações reais.

Para cada uma das 12 ocorrências referidas, determinou-se o valor de *Sismicidade Local*, durante os períodos de tempo de 7, 15 e 30 dias que as precederam.

Ocorrência nº	Lisboa			Andaluzia		
	7 dias	15 dias	30 dias	7 dias	15 dias	30 dias
1	0	0	2	1	1	1
2	0	0	0	0	0	1
3	1	1	2	1	2	4
4	0	0	0	1	1	2
5	0	0	0	9	9	10
6	0	0	0	3	6	13

Quadro 6.2.1.1 - Número de ocorrências de qualquer magnitude verificadas no período de tempo T_0 que precedeu as 12 ocorrências estudadas

Recorde-se que, no quadro 6.2.1.1, as situações números 1 e 2 precederam sismos de fraca magnitude e as situações números 3 a 6 precederam sismos de forte magnitude.

centro	Oc. nº	7 dias		15 dias		30 dias	
		ga _{SL}	pontuação	ga _{SL}	pontuação	ga _{SL}	pontuação
0.6	1	A	-2	A	-2	A	-2
	2	N	1	N	1	A	-2
	3	A	2	A	2	A	2
	4	A	2	A	2	A	2
	5	A	2	A	2	A	2
	6	A	2	A	2	A	2
0.8	1	V	2	V	2	V	2
	2	N	1	N	1	V	2
	3	V	0	A	2	A	2
	4	V	0	V	0	A	2
	5	A	2	A	2	A	2
	6	A	2	A	2	A	2
1.0	1	V	2	V	2	V	2
	2	N	1	N	1	V	2
	3	V	0	A	2	A	2
	4	V	0	V	0	A	2
	5	A	2	A	2	A	2
	6	A	2	A	2	A	2
1.2	1	V	2	V	2	V	2
	2	N	1	N	1	V	2
	3	V	0	A	2	A	2
	4	V	0	V	0	A	2
	5	A	2	A	2	A	2
	6	A	2	A	2	A	2
1.4	1	N	1	N	1	N	1
	2	N	1	N	1	N	1
	3	N	-2	A	2	A	2
	4	N	-2	N	-2	A	2
	5	A	2	A	2	A	2
	6	A	2	A	2	A	2
1.6	1	N	1	N	1	N	1
	2	N	1	N	1	N	1
	3	N	-2	A	2	A	2
	4	N	-2	N	-2	A	2
	5	A	2	A	2	A	2
	6	A	2	A	2	A	2
1.8	1	N	1	N	1	N	1
	2	N	1	N	1	N	1
	3	N	-2	V	0	A	2
	4	N	-2	N	-2	V	0
	5	A	2	A	2	A	2
	6	A	2	A	2	A	2
2.0	1	N	1	N	1	N	1
	2	N	1	N	1	N	1
	3	N	-2	V	0	A	2
	4	N	-2	N	-2	V	0
	5	A	2	A	2	A	2
	6	A	2	A	2	A	2

Quadro 6.2.1.2 - Grau de alarme associado à *Sismicidade Local* e pontuação de resultados, para a região da Andaluzia

Legenda :

N - ausência de alarme ou vigilância
V - vigilância
A - alarme

Dado que, no catálogo sísmico utilizado, quase não existem registos de pequenos abalos, que precedem sismos de forte magnitude, na região de Lisboa, optou-se por calibrar a variável *centro* apenas com base nos registos para a região da Andaluzia.

Este facto tem como base a suspeita de que, a quase inexistência de registos de pequenos abalos, que precedem sismos de forte magnitude, na região de Lisboa, tem como motivo a falta, nesta região, de registos sísmicos, especialmente de baixa magnitude, e não a sua inexistência.

Para cada um dos 6 registos sísmicos, relativos à região da Andaluzia, determinou-se ga_{SL} para os seguintes valores de *centro*: 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 e 2.0, obtendo-se resultados que se apresentam no quadro 6.2.1.2.

O quadro 6.2.1.3 apresenta a soma dos valores de pontuação obtidos, para as 6 situações estudadas, de acordo com o sistema de pontuação utilizado (veja-se quadro 6.2.2).

centro	7 dias	15 dias	30 dias
0.6	7	7	4
0.8	7	9	12
1.0	7	9	12
1.2	7	9	12
1.4	2	6	10
1.6	2	6	10
1.8	2	4	8
2.0	2	4	8

Quadro 6.2.1.3 - Total da pontuação obtida para cada valor de *centro*

A selecção dos valores do *centro* foi feita do seguinte modo: de entre os valores com maior pontuação, escolheu-se o(s) que, para todos os horizontes temporais estudados, não apresenta(m) pontuações negativas. Com este critério, seleccionaram-se os seguintes valores de *centro*: 0.8, 1.0 e 1.2 dos quais se escolheu-se o valor 1.0.

Além disso, verificou-se também se o valor de *centro* encontrado está de acordo com a nossa intuição. Com efeito, se durante o período de tempo T_0 , o número de ocorrências registado numa região for igual a **zero**, é de esperar que a sismicidade seja considerada **reduzida**. Se o mesmo valor

for igual a **um**, o mais lógico será considerar-se a situação de **moderadamente preocupante**. Por último, se durante o período de tempo T_0 , o número de ocorrências registado numa região for **maior ou igual a dois**, está-se seguramente perante uma situação de **sismicidade elevada**.

Recorde-se que, se os valores de *Sismicidade Local* forem valores médios, obtidos com base em simulações do processo de ocorrências sísmicas, os valores obtidos poderão não ser inteiros.

O valor de *centro* seleccionado está de acordo com o que se acabou de enunciar, pelo que deve ser adoptado, mesmo para a região de Lisboa, obtendo-se assim três conjuntos vagos associados às três classificações de *Sismicidade Local* adoptadas, cuja representação gráfica se encontra na figura 6.2.1.4.

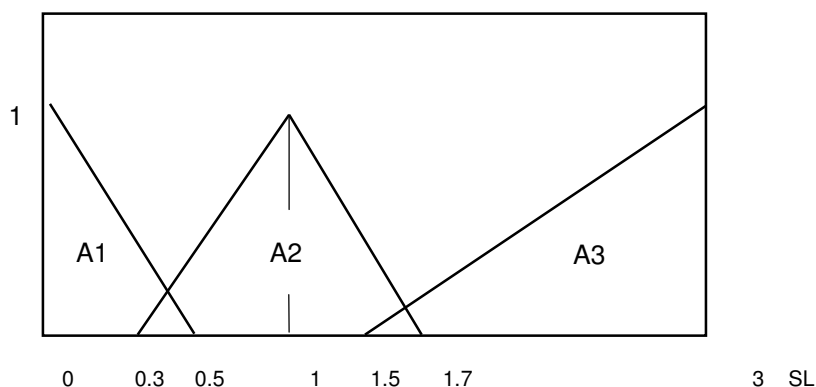


Figura 6.2.1.4 - Representação gráfica da função pertinência dos conjuntos vagos associados à *Sismicidade Local*, para as regiões de Lisboa e Andaluzia e horizontes temporais de 7, 15 e 30 dias

6.2.2 - Análise de resultados

O quadro 6.2.2.1 apresenta os valores do grau de alarme associado à *Sismicidade Local*, calculados para a região de Lisboa e da Andaluzia. Verifica-se que os seus valores são aceitáveis para a região da Andaluzia, não se podendo dizer o mesmo da região de Lisboa, onde os valores de grau de alarme, para as ocorrências números 4 a 6 se situaram abaixo do que seria de esperar.

Como já se referiu, o facto resulta provavelmente, de nesta região, quase não existirem registos sísmicos que tenham precedido sismos de forte magnitude, o que não significa necessariamente que eles não tenham existido.

Oc. nº	Lisboa			Andaluzia		
	7 dias	15 dias	30 dias	7 dias	15 dias	30 dias
1	11.6	11.6	88.2	49.9	49.9	49.9
2	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	49.9
3	49.9	49.9	88.2	49.9	88.1	100
4	11.6	11.6	11.6	49.9	49.9	88.1
5	11.6	11.6	11.6	100	100	100
6	11.6	11.6	11.6	88.2	100	100

Quadro 6.2.2.1 - Grau de alarme associado à *Sismicidade Local*, para a região de Lisboa e da Andaluzia

6.3 - Conclusão

Apresentou-se uma metodologia que permite determinar o grau de alarme associado ao precursor Sismicidade Local.

Concebeu-se um Sistema de Controlo Vago que a cada valor de *Sismicidade Local*, para uma região e um horizonte temporal associa um valor numérico, o grau de alarme do precursor Sismicidade Local.

O referido Sistema foi calibrado com base em 12 situações sísmicas reais (6 ocorridas na região de Lisboa e outras tantas na região da Andaluzia).

Estudaram-se duas regiões sísmicas:

- **Lisboa** (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 1 e 7) e
- **Andaluzia** (a que correspondem as *zonas sísmicas* números 2 e 3),

e três horizontes temporais: **7**, **15** e **30** dias.

Capítulo 7

MEDIDAS DE DESEMPENHO DOS PRECURSORES SÍSMICOS

7.1 - Introdução

Com vista à avaliação da qualidade dos precursores sísmicos utilizados, torna-se necessário determinar adequadas **medidas de desempenho**. Actualmente, estas só podem ser determinadas para os precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, visto só existirem dados suficientes para estes dois precursores. No entanto, a metodologia utilizada não é específica destes precursores, podendo ser alargada futuramente, ao estudo de outros precursores.

Utilizaram-se as seguintes medidas de desempenho:

- percentagem de sismos previstos (ou percentagem de falhas);
- percentagem de falsos alarmes;
- percentagem de tempo de alarme;
- o quociente entre a percentagem de sismos previstos e a percentagem de tempo de alarme, que se designará por **q**.

Considerou-se ainda uma última medida de desempenho, proposta por Grandori, Guagenti e Perotti (Grandori, Guagenti e Perotti, 1988). Designando-se por **p** o número médio de sismos previstos, **fa** o número médio de falsos alarmes e **fs** o número médio de falhas do sistema, valores estes obtidos durante um longo tempo de funcionamento do sistema, define-se

$$• U = \frac{p}{fa + fs}$$

Algumas das medidas de desempenho apresentadas serão aplicadas para comparar os precursores sísmicos utilizados, afim de calcular o grau de alarme sísmico total. Embora esta questão seja abordada no capítulo 8, com o devido detalhe, desde já se nota que algumas medidas de desempenho propostas são interdependentes.

Nas secções 7.2 e 7.3, analisa-se o desempenho, respectivamente, dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local.

7.2 - Medidas de desempenho do precursor Condições Iniciais

No capítulo 5 apresentou-se uma metodologia que permite determinar o grau de alarme associado a um cenário sísmico qualquer. Pretende-se agora encontrar uma metodologia que permita avaliar o precursor Condições Iniciais. Esta avaliação pode ser feita com base na simulação do processo de ocorrências sísmicas, verificando-se o que “acontece”, sempre que ocorre uma *condição inicial* “próxima” daquela que se pretende avaliar.

É claro que se se exigir que, no processo de ocorrências sísmicas, ocorra uma *condição inicial* exactamente igual, a uma previamente fixada, muito dificilmente isso acontecerá. Optou-se então, por verificar quando ocorrem *condições iniciais* “próximas” da *condição inicial* que se pretende estudar. Simula-se o processo de ocorrências sísmicas e verifica-se, para cada ocorrência, se as condições que a precederam são “parecidas” com a *condição inicial* que se pretende estudar.

No caso da condição ser “parecida” com a *condição inicial* em análise é accionado o sistema de **alarme sísmico relativamente ao precursor Condições Iniciais**, que permanecerá activo durante um período de tempo T_0 .

Se, durante este período de tempo, se verificar uma ocorrência de magnitude maior ou igual a G_0 , na região em estudo, considera-se que se está perante um **sismo previsto**. Se porém, durante o período de tempo T_0 não se verificar qualquer ocorrência de magnitude maior ou igual a G_0 , considera-se uma situação de **falso alarme**.

Se, durante a situação de alarme, ocorrer na região em estudo, outro sismo de magnitude maior ou igual a G_0 , a situação de alarme é prolongada durante um período de duração T_0 , a contar desse momento.

Pode também acontecer que ocorra um sismo de magnitude maior ou igual a G_0 , sem que se estivesse numa situação de alarme, ocorrendo então o que se considera uma **falha** do sistema. O quadro 7.2.1 esquematiza as situações possíveis.

Sistema de Alarme	Situação Sísmica	
	$G < G_0$	$G \geq G_0$
Não Alarme	sucesso	insucesso : falha do sistema
Alarme	insucesso : falso alarme	sucesso : sismo previsto

Quadro 7.2.1 - Representação das situações possíveis associadas ao precursor Condições Iniciais

Para avaliar a “proximidade” de um cenário a uma dada *condição inicial* em análise, considerou-se a subdivisão dos três factores intervenientes (Dt-Tempo, G-Grandeza e E-Espaço) que se esquematiza na figura 7.2.1.

Na figura 7.2.1 representou-se por $Dt_{40\%}$ o quantil 40% da distribuição empírica de Dt e $G_{60\%}$ o quantil 60% da distribuição empírica de G. De acordo com o quadro 3.2.1.1, $Dt_{40\%} = 0.0014159$ (anos) e $G_{60\%} = 3.5$ (Richter).

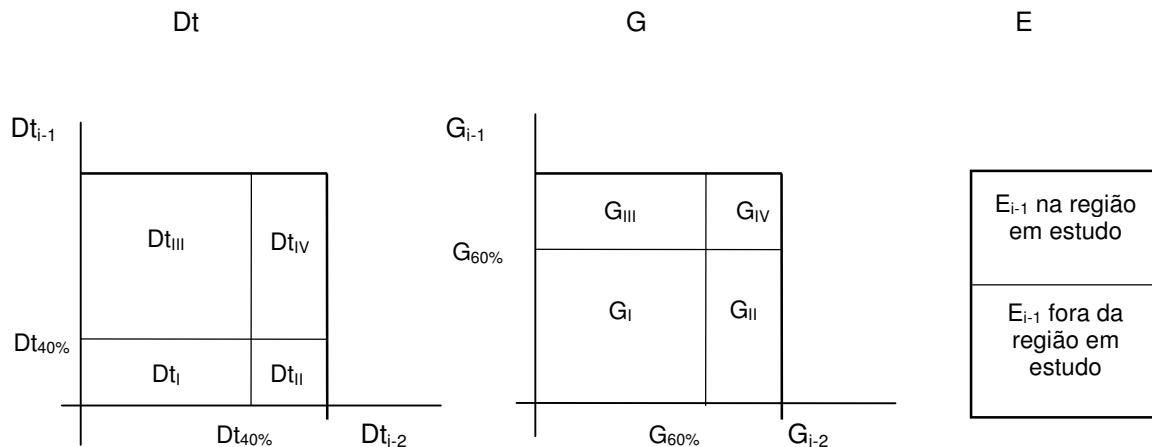


Figura 7.2.1 - Subdivisão de Dt, G e E, com vista à avaliação da “proximidade” de um cenário a uma condição inicial

Considere-se a *condição inicial* número 4, apresentada no quadro 5.2.1.1.1:

Data	G i	E i	Dt		G		E i-1
			i-2	i-1	i-2	i-1	
1941.2822584	5.22	7	0.0010589	0.0260929	4.20	3.62	16

como se pode observar, a localização da ocorrência precedente ($E_{i-1} = 16$) ocorreu fora da região sísmica em análise ($E_{i-1} = \{1, 7\}$). Por outro lado, quando se comparam os valores relativos a Dt e a G com os “valores fronteira” (Dt_{40} e $G_{60\%}$), pode concluir-se que, de acordo com a terminologia adoptada na figura 7.2.1, se deve ter Dt_{III} e G_{IV} . Assim, durante uma simulação do processo de ocorrências sísmicas, sempre que uma nova ocorrência origine uma situação caracterizada por “ Dt_{III} , G_{IV} e seja fora da região de Lisboa ($E_{i-1} = 1$ ou 7) considera-se estar perante um cenário gerado “próximo” da condição inicial número 4 referida.

Relativamente ao factor Tempo, admitiu-se que seria de considerar duas situações:

- valores inferiores ao percentil 40% da distribuição empírica de D_t ;
- valores superiores ou iguais ao percentil 40% da distribuição empírica de D_t .

Para o factor Grandeza consideraram-se também duas situações:

- valores superiores ao percentil 60% da distribuição empírica de G ;
- valores inferiores ou iguais ao percentil 60% da distribuição empírica de G .

Para o factor Espaço, dada a sua natureza discreta, consideraram-se as situações:

- o epicentro da última ocorrência situou-se na região em estudo;
- o epicentro da última ocorrência situou-se fora da região em estudo.

Refira-se que, antes de se optar pela subdivisão esquematizada na figura 7.2.1, experimentou-se considerar uma análise mais fina, para cada um dos factores Tempo e Grandeza, tendo-se considerado:

- valores inferiores ao percentil 40% da distribuição empírica do factor;
- valores entre os percentis 40 e 60% da distribuição empírica do factor;
- valores superiores ao percentil 60% da distribuição empírica do factor.

Porém, face ao volume de dados disponíveis, verificou-se que esta análise era demasiado “fina”, o que se traduziu num reduzido tempo de alarme, e consequentemente, numa baixa percentagem de sismos previstos, pelo que se adoptou a perspectiva esquematizada na figura 7.2.1.

7.2.1 - Experiências efectuadas

Simulou-se o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica e, para cada um dos 12 cenários sísmicos **reais** anteriormente estudados (ver quadros 5.2.1.1.1 e 5.2.1.1.2), verificou-se quando ocorria um cenário sísmico “parecido” (como se exemplificou anteriormente). Quando tal acontece, o sistema de alarme sísmico deve entrar em situação de alarme, durante o período de tempo T_0 .

Recorde-se que, as *condições iniciais* nºs 1 e 2 precederam sismos de fraca magnitude (magnitude Richter entre 3.0 e 4.0) e as *condições iniciais* nºs 3 a 6 precederam sismos de forte magnitude (magnitude Richter superior ou igual a 5.0).

Efectuaram-se 10 simulações, de 100 anos cada, do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica.

Estudaram-se duas **regiões: Lisboa e Andaluzia**, três **períodos de tempo: 7, 15 e 30 dias**, e considerou-se $G_0 = 4.0$.

Nos quadros 7.2.1.1 e 7.2.1.2 apresenta-se as medidas de desempenho para o precursor Condições Iniciais.

T0	Cl. nº	% previstos	% falhas	% f. alarmes	t. alarme	q	U
7 dias	1	37.14	62.86	50.95	19.17	1.9	0.33
	2	28.11	71.89	49.39	16.30	1.7	0.23
	3	20.34	79.66	73.13	7.36	2.8	0.13
	4	12.86	87.14	77.61	6.47	2.0	0.08
	5	16.11	83.89	78.17	8.02	2.0	0.10
	6	45.74	54.26	33.65	30.60	1.5	0.52
15 dias	1	49.23	50.77	34.26	32.16	1.5	0.58
	2	43.61	56.39	38.90	27.71	1.6	0.46
	3	27.83	72.17	60.45	14.35	1.9	0.21
	4	20.53	79.47	66.30	12.64	1.6	0.14
	5	26.85	73.15	66.54	15.93	1.7	0.19
	6	61.33	38.67	21.43	46.46	1.3	1.02
30 dias	1	66.10	33.90	21.89	48.80	1.4	1.18
	2	59.80	40.20	26.55	44.72	1.3	0.90
	3	36.43	63.57	48.41	25.44	1.4	0.33
	4	30.15	69.85	54.02	22.59	1.3	0.24
	5	40.75	59.25	51.27	28.57	1.4	0.37
	6	75.30	24.70	10.96	65.07	1.2	2.11

Quadro 7.2.1.1 - Medidas de desempenho para o precursor Condições Iniciais, na região de Lisboa

T0	Cl. nº	% previstos	% falhas	% f. alarmes	t. alarme	q	U
7 dias	1	23.65	76.35	44.31	13.12	1.80	0.20
	2	36.72	63.28	35.67	23.24	1.58	0.37
	3	6.20	93.80	66.03	2.10	2.95	0.04
	4	31.31	68.69	65.17	15.45	2.03	0.23
	5	14.34	85.66	41.68	6.02	2.38	0.11
	6	13.56	86.44	69.88	5.91	2.29	0.09
15 dias	1	36.05	63.95	32.88	23.10	1.56	0.37
	2	52.65	47.35	21.15	38.11	1.38	0.77
	3	9.58	90.42	54.16	4.35	2.20	0.07
	4	45.05	54.95	44.80	29.72	1.52	0.45
	5	21.17	78.83	33.52	11.58	1.83	0.19
	6	20.95	79.05	57.08	12.17	1.72	0.15
30 dias	1	51.06	48.94	18.60	38.82	1.32	0.76
	2	68.67	31.33	9.73	56.91	1.21	1.67
	3	13.69	86.31	41.83	8.34	1.64	0.11
	4	63.95	36.05	22.24	51.12	1.25	1.10
	5	29.91	70.09	23.03	20.85	1.43	0.32
	6	30.43	69.57	40.18	22.80	1.33	0.28

Quadro 7.2.1.2 - Medidas de desempenho para o precursor Condições Iniciais, na região da Andaluzia

Com vista a facilitar a interpretação dos quadros anteriores, apresenta-se nas figuras seguintes, a representação gráfica dos resultados obtidos. De notar que, ainda que, a *condição inicial* número 1 não esteja relacionada com a *condição inicial* número 2, optou-se por unir os pontos correspondentes, para facilitar a visualização.

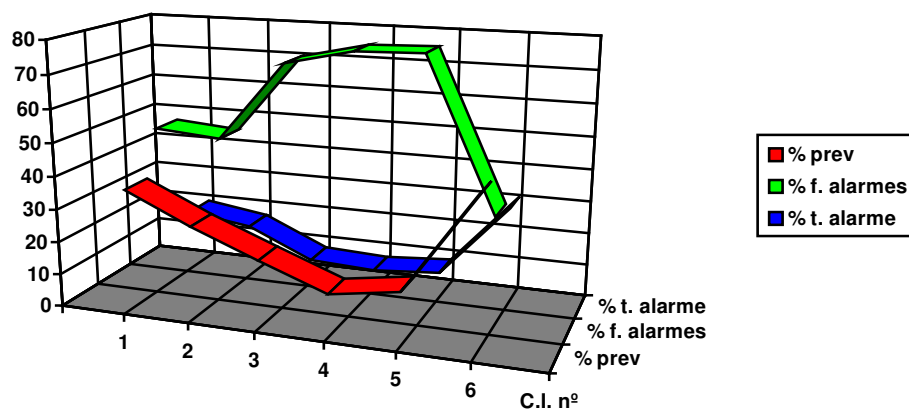


Figura 7.2.1.1 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, T0 = 7 dias

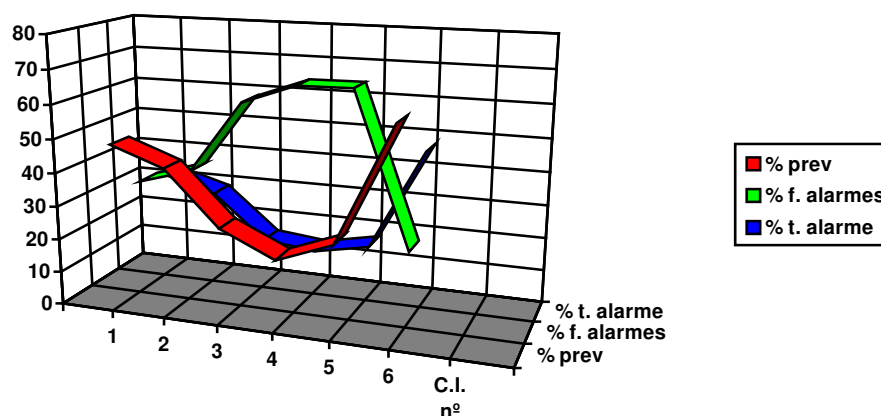


Figura 7.2.1.2 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, T0 = 15 dias

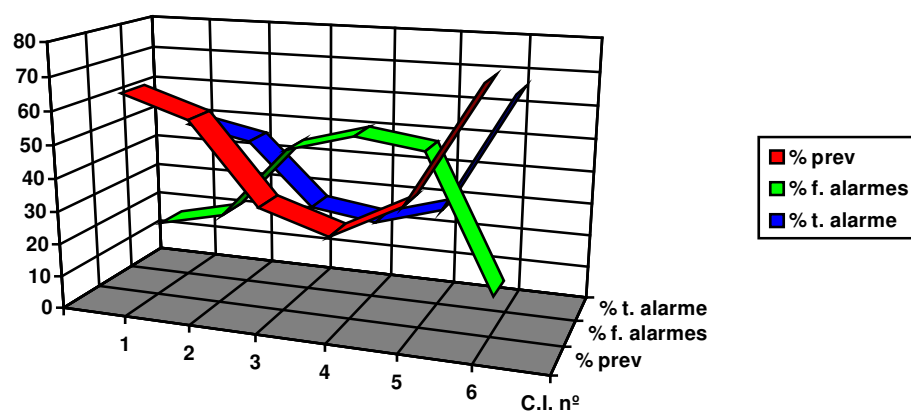


Figura 7.2.1.3 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 30$ dias

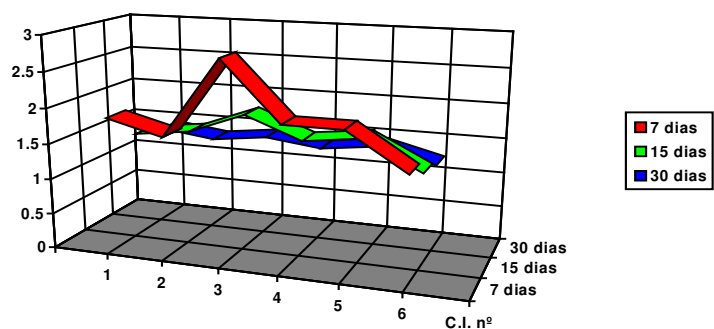


Figura 7.2.1.4 - Valores de q para a região de Lisboa

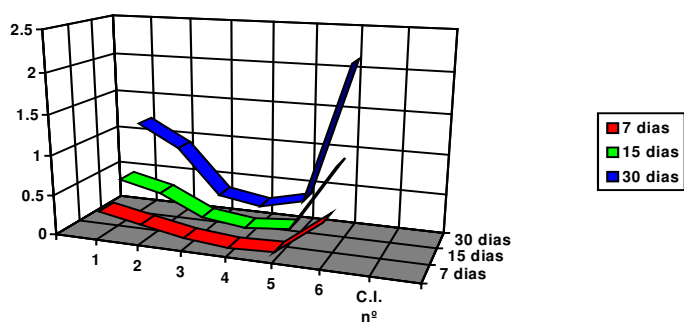


Figura 7.2.1.5 - Valores de U para a região de Lisboa

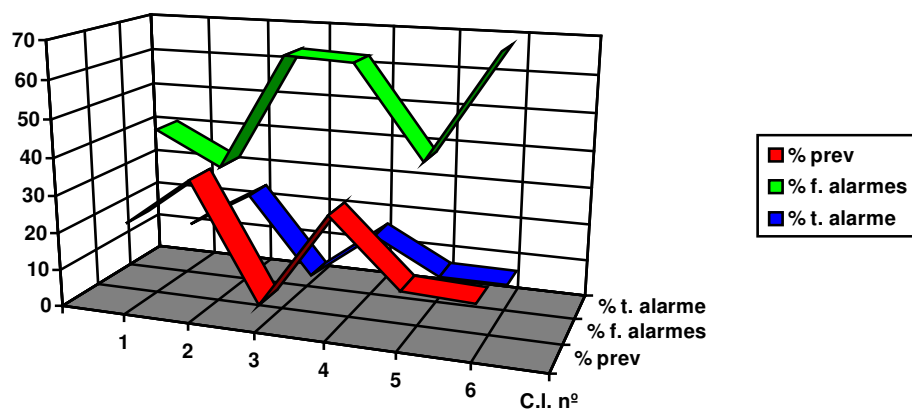


Figura 7.2.1.6 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias

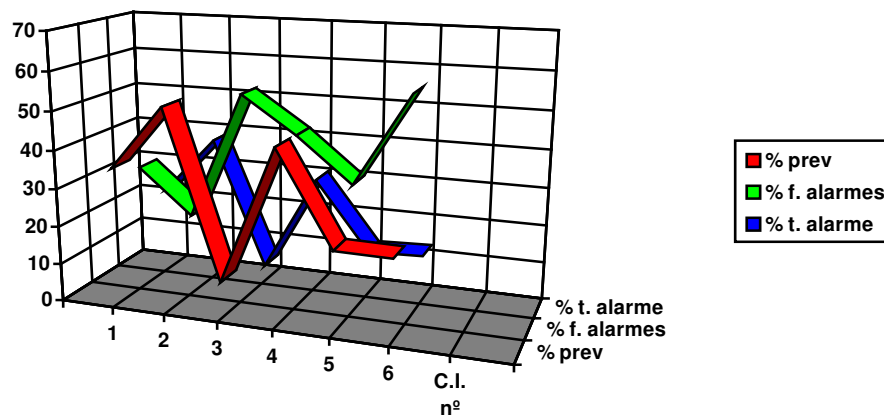


Figura 7.2.1.7 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias

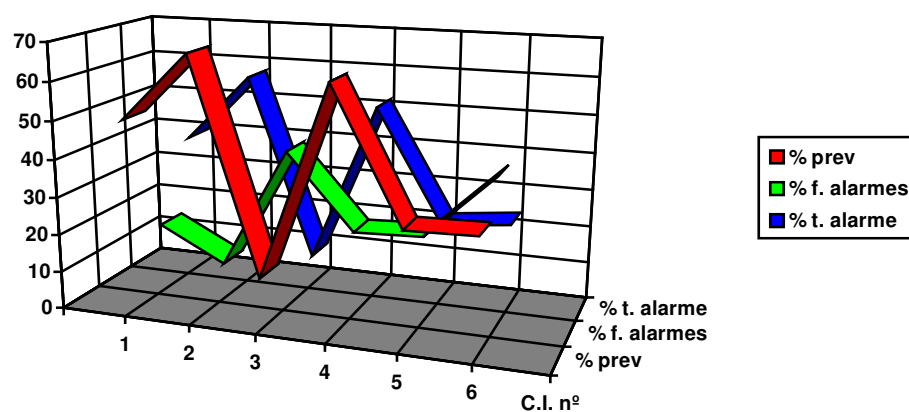


Figura 7.2.1.8 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 30$ dias

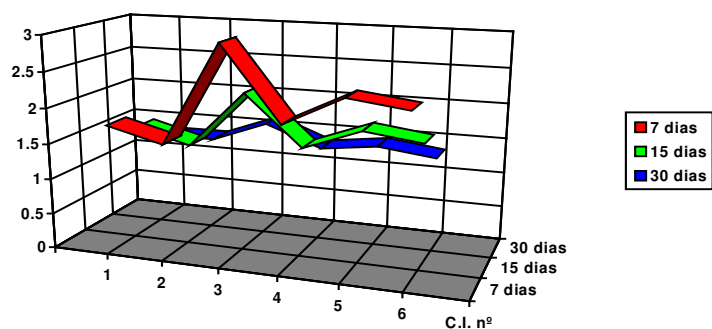


Figura 7.2.1.9 - Valores de q para a região da Andaluzia

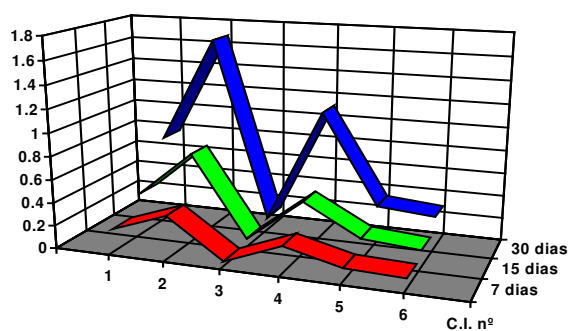


Figura 7.2.1.10 - Valores de U para a região da Andaluzia

7.2.2 - Análise de resultados

Das figuras 7.2.1.1 a 7.2.1.10 destaca-se o seguinte:

- o quociente **q** da percentagem de sismos previstos, pelo correspondente tempo de alarme, é sempre maior do que 1.0, o que significa que a percentagem de sismos previstos é sempre superior à percentagem de tempo de alarme necessário para os prever. Porém, para cada cenário sísmico estudado, à medida que o horizonte temporal aumenta, os correspondentes valores de **q** diminuem. Este facto é bem visível nas figuras 7.2.1.4 e 7.2.1.9, em que, quanto menor é o horizonte temporal, mais acima se situam as curvas representativas de **q**. Tal significa que, o aumento do horizonte temporal diminui a “eficácia” da relação entre sismos previstos e tempo de alarme necessário para os prever.
- O quociente **U**, apresenta um comportamento bastante diferente do quociente **q**. Observando as figuras 7.2.1.5 e 7.2.1.10, verifica-se que, para cada cenário sísmico estudado, quanto maior for o horizonte temporal, maiores são os valores de **U**. De referir ainda que, para os cenários sísmicos estudados, os quocientes **q** e **U**, apresentam comportamentos opostos, ou seja, aos cenários que apresentam maiores valores de **q**, correspondem menores valores de **U**, e vice-versa.
- A diferenciação entre as curvas representativas das percentagens de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme diminui, à medida que o horizonte temporal aumenta. Este resultado está de acordo com as conclusões tiradas aquando do estudo das *condições iniciais*. Com efeito, no capítulo 3, verificou-se que a influência das *condições iniciais* diminui, à medida que o horizonte temporal aumenta.
- As curvas representativas da percentagem de sismos previstos e percentagem de tempo de alarme têm comportamento semelhante.
- A percentagem de falsos alarmes diminui com o aumento do horizonte temporal;
- A percentagem de sismos previstos aumenta com o aumento do horizonte temporal;
- A percentagem de tempo de alarme aumenta com o aumento do horizonte temporal.

Estes resultados mostram que a melhor solução a tomar depende do(s) critério(s) que o decisor achar mais importante(s). A melhor solução a adoptar em cada caso, depende do risco que se admite correr e do “preço” que se está disposto a pagar. O “preço” refere-se, obviamente, a tempo de alarme e a falsos alarmes.

7.3 - Medidas de desempenho do precursor Sismicidade Local

Um sistema de alarme sísmico baseado neste precursor deve ser tal que, se o valor de *Sismicidade Local* for maior ou igual a um valor pré-fixado **K**, o sistema deve entrar em “alarme” e assim permanecer durante um período de tempo T_0 .

Caso o valor de *Sismicidade Local* seja inferior a **K**, o sistema não deve entrar em alarme.

Para determinar os valores das medidas de desempenho do precursor Sismicidade Local simula-se o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, durante um largo período de tempo (da ordem de dezenas ou centenas de anos) e, sempre que durante o período de tempo T_0 a *Sismicidade Local* for maior ou igual a **K**, considera-se que o sistema deve entrar em situação de alarme e assim permanecer durante um período de tempo - T_0 . Se durante esse tempo ocorrer um abalo sísmico de magnitude considerável (maior ou igual a G_0), considera-se que esse sismo foi **previsto**. Caso contrário, obteve-se um **falso alarme**.

Se, durante um período de tempo T_0 a *Sismicidade Local* não exceder **K**, considera-se que o sistema não deve entrar em situação de alarme. Se durante uma situação de ausência de alarme, ocorrer um abalo de magnitude maior ou igual a G_0 , esse sismo não foi previsto, ou seja ocorreu uma **falha** do sistema.

Um Sistema de Alarme Sísmico pode assim apresentar as seguintes situações, conforme se esquematiza no quadro 7.3.1.

	Situação Sísmica	
Sistema de Alarme	<i>Sismicidade Local</i> < K	<i>Sismicidade Local</i> ≥ K
Não Alarme	sucesso	insucesso : falha do sistema
Alarme	insucesso : falso alarme	sucesso : sismo previsto

Quadro 7.3.1 - Representação das situações possíveis associadas ao precursor Sismicidade Local

7.3.1 - Experiências efectuadas

Para determinar os valores das medidas de performance para o precursor Sismicidade Local efectuaram-se 10 simulações, de 100 anos cada, do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica.

Estudaram-se as regiões de **Lisboa** e da **Andaluzia** e os horizontes temporais **7, 15 e 30 dias**. Para a região de Lisboa experimentaram-se os valores 1, 2 e 3 para a constante **K**. Dado que na região da Andaluzia, o número de ocorrências de qualquer magnitude é consideravelmente maior do que na região de Lisboa, experimentaram-se os seguintes valores de **K**: 1, 2, 3, 4, 6, 9 e 10. Para ambas as regiões considerou-se $G_0 = 4$.

Os quadros 7.3.1.1.e 7.3.1.2 apresentam a percentagem de: sismos previstos, falhas, falsos alarmes, tempo de alarme e ainda os quocientes - **q** e **U**.

Com vista a facilitar a interpretação dos referidos quadros, apresenta-se nas figuras 7.3.1 a 7.3.10, a representação gráfica dos resultados obtidos.

T0	K	% previstos	% falhas	% f. alarmes	% t. alarme	q	U
7 dias	1	12.1	87.9	96.9	8.6	1.4	0.1
	2	2.0	98.0	95.9	1.0	2.0	0.0
	3	0.3	99.7	95.4	0.1	3.0	0.0
15 dias	1	21.3	78.7	94.1	16.8	1.3	0.1
	2	5.7	94.3	91.8	3.2	1.8	0.0
	3	1.4	98.6	90.2	0.7	2.0	0.0
30 dias	1	33.0	67.0	90.1	30.3	1.1	0.2
	2	11.3	88.7	87.9	8.4	1.3	0.1
	3	3.5	96.5	86.6	2.3	1.5	0.0

Quadro 7.3.1.1 - Medidas de desempenho do precursor Sismicidade Local, para a região de Lisboa

T0	K	% previstos	% falhas	% f. alarmes	% t. alarme	q	U
7 dias	1	52.0	48.0	88.1	37.0	1.4	0.4
	2	27.8	72.2	86.3	17.2	1.6	0.2
	3	15.3	84.7	85.5	8.9	1.7	0.1
	4	8.7	91.3	84.1	4.6	1.9	0.0
	6	2.4	97.6	82.1	1.1	2.2	0.0
	9	0.1	99.9	93.9	0.1	1.0	0.0
	10	0.1	99.9	92.7	0.1	1.0	0.0
15 dias	1	67.8	32.2	80.0	56.7	1.2	0.6
	2	44.4	55.6	79.0	35.4	1.3	0.3
	3	28.9	71.1	79.1	23.2	1.2	0.2
	4	19.4	90.6	78.8	15.4	1.3	0.1
	6	7.6	92.4	79.1	6.1	1.2	0.0
	9	1.6	98.4	77.3	1.2	1.3	0.0
	10	1.0	99.0	77.0	0.7	1.4	0.0
30 dias	1	79.0	21.0	68.7	76.3	1.0	0.9
	2	63.1	36.9	67.6	58.7	1.1	0.6
	3	50.6	49.4	66.4	45.5	1.1	0.4
	4	39.6	60.4	66.1	35.3	1.1	0.3
	6	23.1	76.9	65.8	20.4	1.1	0.2
	9	8.6	91.4	65.3	7.3	1.2	0.1
	10	6.4	93.6	61.6	5.1	1.3	0.0

Quadro 7.3.1.2 - Medidas de desempenho do precursor Sismicidade Local, para a região da Andaluzia

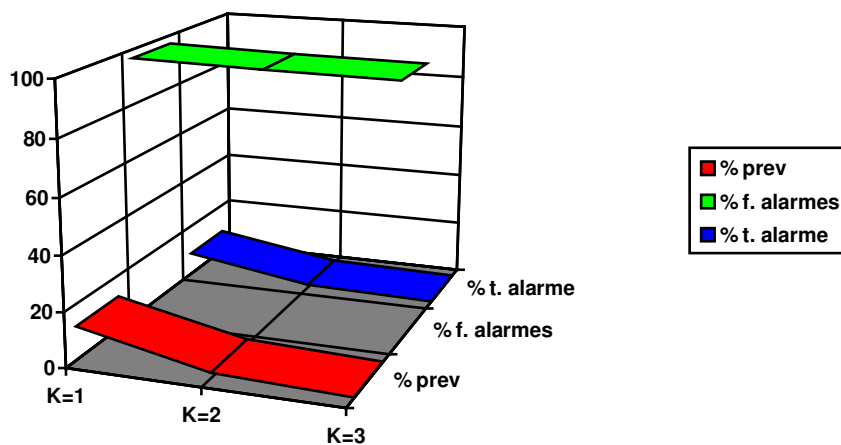


Figura 7.3.1.1 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias

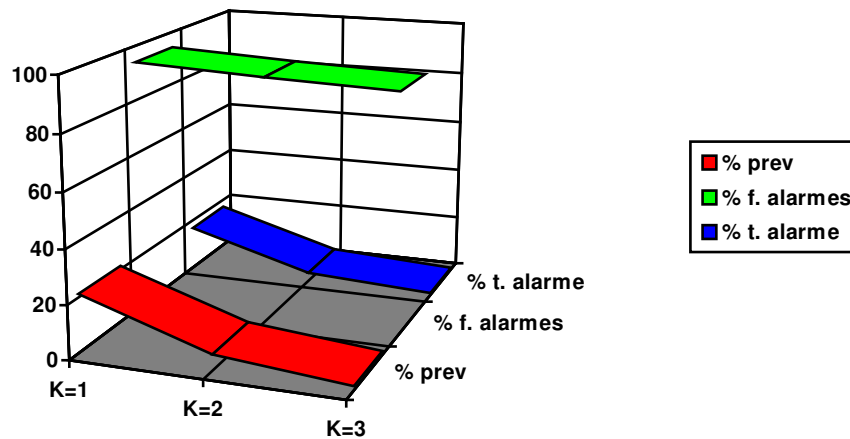


Figura 7.3.1.2 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 15$ dias

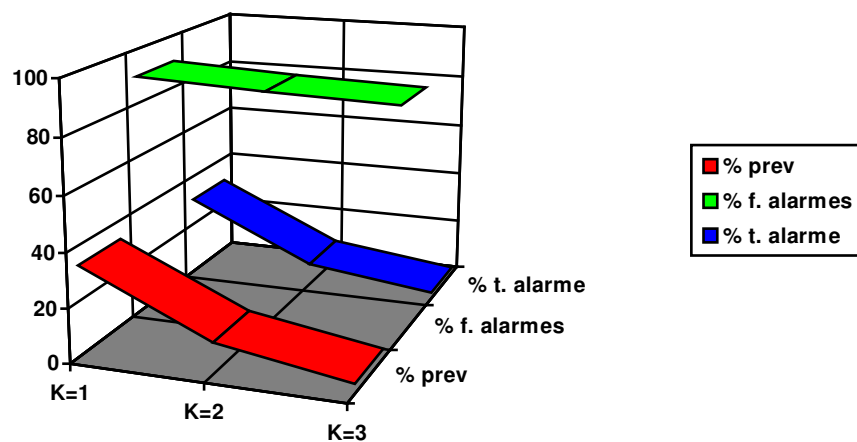


Figura 7.3.1.3 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região de Lisboa, $T_0 = 30$ dias

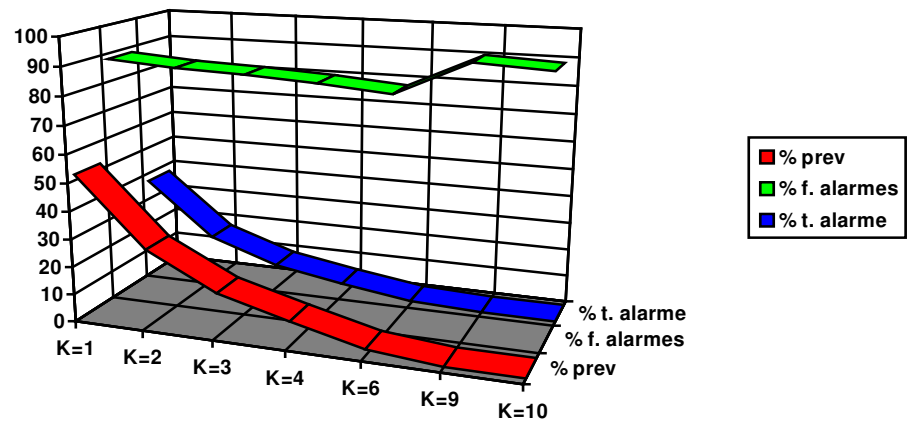


Figura 7.3.1.4 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias

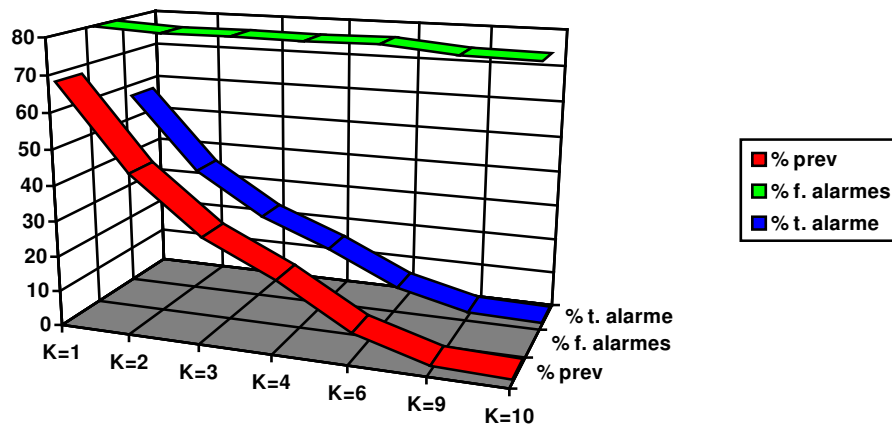


Figura 7.3.1.5 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias

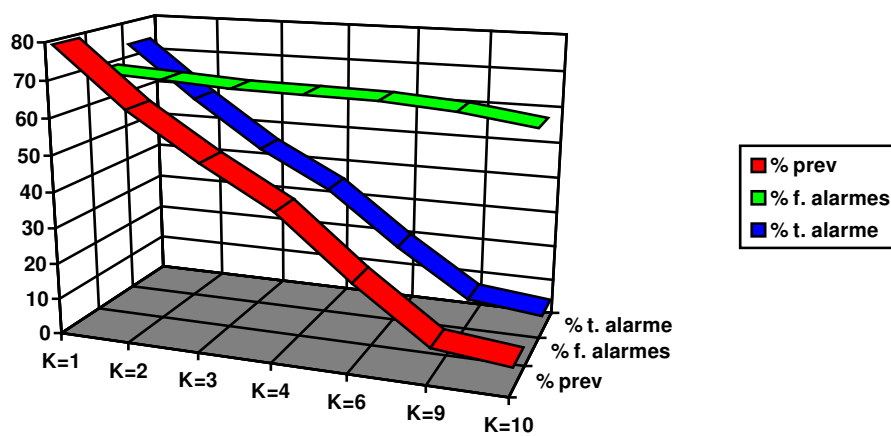


Figura 7.3.1.6 - Representação gráfica da percentagem de sismos previstos, falsos alarmes e tempo de alarme, para a região da Andaluzia, $T_0 = 30$ dias

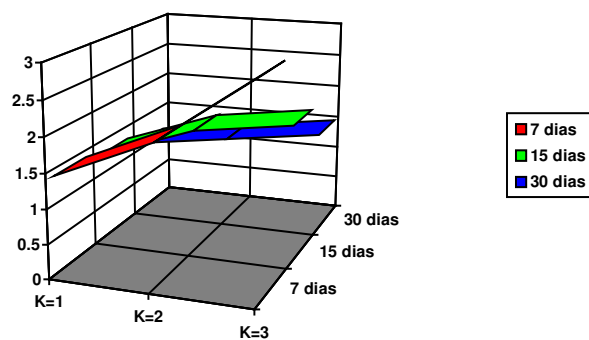


Figura 7.3.1.7 - Valores de q , para a região de Lisboa

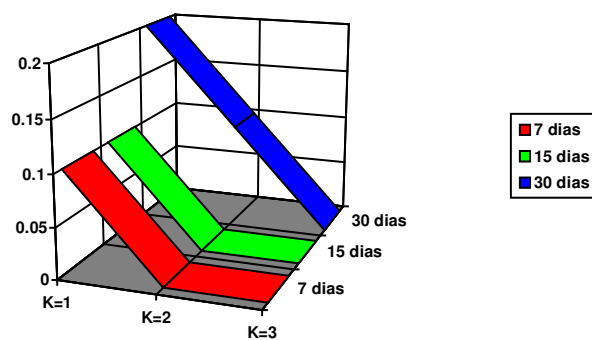


Figura 7.3.1.8 - Valores de U , para a região de Lisboa

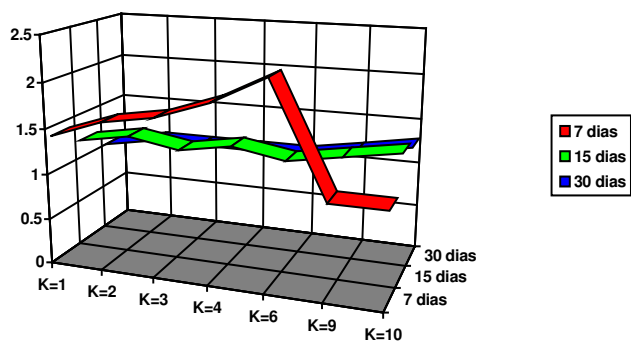


Figura 7.3.1.9 - Valores de q , para a região da Andaluzia

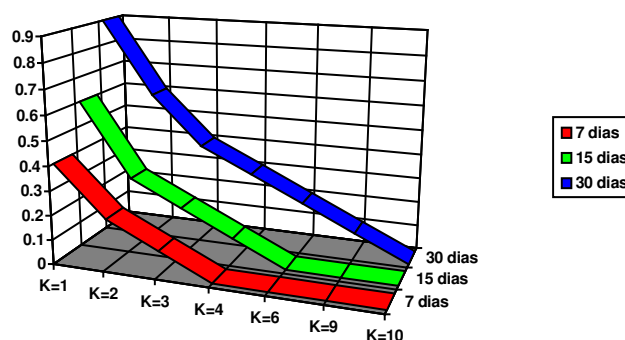


Figura 7.3.1.10 - Valores de U , para a região da Andaluzia

7.3.2 - Análise de resultados

Verifica-se que, para os três horizontes temporais, e duas regiões estudadas, a percentagem de sismos previstos é sempre superior à correspondente percentagem de tempo de alarme, o que se manifesta em valores de q maiores ou iguais a 1.

Da análise das figuras 7.3.1.1 a 7.3.1.6 destaca-se, em todos os casos estudados, o seguinte:

- a percentagem de falsos alarmes é muito grande, situando-se entre 61.6% e 96.9%. No entanto, esta percentagem diminui ligeiramente à medida que K aumenta (excepto para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias).

Verifica-se também que, na região de Lisboa, a percentagem de falsos alarmes é um pouco superior à registada, para iguais períodos de tempo, e mesmos valores de K (idênticas circunstâncias), na região da Andaluzia;

- a percentagem de sismos previstos aumenta com o aumento do horizonte temporal, e diminui com o aumento da constante K .

Na região de Lisboa, a percentagem de sismos previstos é notavelmente inferior à observada para a região da Andaluzia, em idênticas circunstâncias;

- a percentagem de tempo de alarme aumenta com o aumento do horizonte temporal, e diminui com o aumento da constante K . Na região da Andaluzia, a percentagem de

tempo de alarme é visivelmente superior à observada para a região de Lisboa, em idênticas circunstâncias;

Em resumo, dado que a percentagem de falsos alarmes varia pouco em cada região, a relação mais notória é a seguinte:

aumento de sismos previstos \Rightarrow aumento de tempo de alarme.

- Relativamente ao quociente **q** verifica-se, para os valores estudados na região de Lisboa, que ele aumenta com o aumento da constante **K**, e diminui com o aumento do horizonte temporal.

Na região da Andaluzia, verifica-se que os valores de **q** diminuem com o aumento do horizonte temporal, e que variam com a constante **K**.

Os valores de **q** são notavelmente maiores na região da Andaluzia.

- O quociente **U** aumenta com o aumento do horizonte temporal, e diminui com o aumento da constante **K**.

Na região da Andaluzia, onde se experimentaram valores de **K** superiores a 3, verifica-se, para esses casos, que os valores de **U** são nulos ou próximos de zero.

Para valores de **K** até três (em que há resultados para ambas as regiões) verifica-se que os quocientes **q** e **U** apresentam comportamentos opostos, quer isto dizer que, às situações que apresentam maiores valores de **q**, correspondem menores valores de **U**, e vice-versa.

Os baixos valores das medidas de desempenho do precursor Sismicidade Local, para valores de **K** superiores a 3, explicam-se pelo facto, de estas situações terem ocorrido muito poucas vezes no processo de ocorrências sísmicas da Península Ibérica, o que resulta num baixo tempo de alarme, e consequente reduzida percentagem de sismos previstos.

Compete ao gestor do sistema de alarme sísmico optar pela decisão mais adequada a cada região. Por exemplo, se se estiver a estudar uma região de baixa densidade populacional, mas com estruturas de risco, tais como centrais nucleares, barragens, fábricas de resíduos tóxicos, etc., será razoável optar por um elevado número de sismos previstos, mesmo que tal implique um aumento de

tempo de alarme. Por outro lado, se a região em causa não apresentar estruturas de risco, seria imprudente optar por elevado tempo de alarme, visto que o benefício não superaria o descrédito no Sistema de Alarme, por parte da população.

7.4 - Conclusão

Determinaram-se as seguintes medidas de desempenho dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local:

- percentagem de sismos previstos (ou percentagem de falhas);
- percentagem de falsos alarmes;
- percentagem de tempo de alarme;
- o quociente entre a percentagem de sismos previstos e a percentagem de tempo de alarme, que se designará por **q**.

Considerou-se ainda uma última medida de desempenho, em que **p** designa o número médio de sismos previstos, **fa** o número médio de falsos alarme e **fs** o número médio de falhas do sistema, valores estes obtidos durante um longo tempo de funcionamento do sistema:

$$\bullet U = \frac{p}{fa + fs}$$

Estudaram-se duas regiões sísmicas: **Lisboa** e **Andaluzia** três horizontes temporais: **7**, **15** e **30** dias.

As medidas de desempenho determinadas servem para avaliar isoladamente cada um dos precursores sísmicos e irão também servir para determinar o “peso” que os graus de alarme, relativos a cada precursor, devem ter no grau de alarme sísmico total.

Capítulo 8

GRAU DE ALARME SÍSMICO

8.1 - Introdução

Pretende-se conceber um Sistema de Alarme Sísmico, que a partir do grau de alarme relativo a cada um dos precursores considerados, origine um ***Grau de Alarme Sísmico Total*** (ou simplesmente ***Grau de Alarme Sísmico***).

Utilizaram-se dois precursores sísmicos:

- as *Condições Iniciais* do modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, que contém informação sobre as duas últimas ocorrências sísmicas nesta Península, correspondendo ao passado sísmico recente;
- a *Sismicidade Local*, ou seja o número de ocorrências sísmicas de qualquer magnitude, registadas na região em estudo, durante um período de tempo T0.

Já se referiu anteriormente (veja-se 2.2) que não foi possível encontrar, para a Península Ibérica, dados temporais referentes a outras grandezas, que poderiam constituir precursores sísmicos, tais como:

- concentrações de Radão na água de poços profundos;
- resistividade eléctrica da crosta terrestre;
- variações na relação entre a velocidade das ondas compressivas, ou primárias - vP e das ondas transversais ou secundárias - vS, *versus* intervalos de acalmia;

- variações do campo magnético terrestre;
- variações no nível freático, não relacionadas com a pluviosidade;
- sismos com valores de intensidade ou magnitude compreendidos dentro de certos intervalos.

Se existissem dados referentes a estas grandezas, elas deveriam também ser incorporadas no Sistema de Alarme Sísmico. Seria necessário determinar, para cada precursor sísmico, o respectivo grau de alarme, englobando-os depois no *Grau de Alarme Sísmico*.

Como actualmente só existem dados suficientes para os precursores *Condições Iniciais e Sismicidade Local*, o Sistema de Alarme Sísmico será construído com base nestes precursores, sendo no entanto possível, conceber um aumento futuro do número de precursores a utilizar.

O “input” do Sistema de Alarme Sísmico é a **situação sísmica**, ou seja, o passado sísmico recente, na Península Ibérica (Condições Iniciais), e o número de ocorrências de qualquer magnitude, ocorridas durante um período de tempo T_0 , na região para a qual se pretende determinar o grau de alarme sísmico (Sismicidade Local).

O “output” será o **Grau de Alarme Sísmico - GA**, para a região em causa, durante um período de tempo T_0 , que se poderá traduzir num valor numérico entre 0 e 100. Este valor poderá, de algum modo, ser convertido, por um agente de decisão, em:

- ausência de alarme ou vigilância (situação normal);
- vigilância;
- alarme.

De notar, contudo, que esta associação não deve ser fixa, devendo depender, por exemplo, do *risco sísmico* da região em estudo (o que considera, de algum modo, as especificidades da região no que toca às estruturas de maior risco e à densidade populacional, entre outros factores).

Pode propor-se, por exemplo, para uma região com moderado risco sísmico, a associação seguinte:

$GA \in [0, 40]$ - ausência de alarme ou vigilância (situação normal);

$GA \in [30, 70]$ - vigilância;

$GA \in [60, 100]$ - alarme ;

Verifica-se, neste exemplo, que os três subconjuntos associados a GA, não são disjuntos. Por exemplo, $GA = 65$ indica tratar-se de uma situação de vigilância e também de uma situação de alarme.

Esta classificação parece aplicar-se bem à prática, já que é complicado definir limites rígidos, para a classificação do *Grau de Alarme Sísmico*, mesmo para uma zona com risco sísmico conhecido. Mais uma vez se torna útil o recurso à teoria dos Conjuntos Vagos, onde um elemento pode pertencer a diversos Subconjuntos Vagos, com um “certo grau de pertença”.

Para uma região de baixo *risco sísmico*, as situações de alarme e vigilância podem corresponder a valores mais elevados de GA, do que as apresentadas no exemplo anterior. Para uma região de elevado *risco sísmico*, deve passar-se o contrário.

Falta então encontrar um processo que permita determinar o *Grau de Alarme Sísmico* para uma região, durante um período de tempo T_0 .

Tendo-se já apresentado a metodologia que permite determinar o grau de alarme relativo aos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, falta encontrar um processo de os “combinar”, por forma a obter o *Grau de Alarme Sísmico*, numa região, durante um período de tempo T_0 .

Será legítimo “somar” os diversos valores de grau de alarme, relativos a cada precursor e considerar a soma resultante, o *Grau de Alarme Sísmico*? Neste caso, considera-se que cada precursor tem o mesmo contributo para o *Grau de Alarme Sísmico Total*. Porém, se um precursor for “mais eficiente” do que outro, então esta abordagem não estará correcta. Para verificar a “eficiência” de um precursor consideraram-se as seguintes medidas de desempenho:

- percentagem de sismos previstos (ou de falhas);
- percentagem de falsos alarmes;
- percentagem de tempo de alarme.

No capítulo 7 apresentou-se uma metodologia que permite determinar as medidas de desempenho para os dois precursores utilizados.

Determinaram-se também os dois quocientes:

- $q = \text{percentagem de sismos previstos} / \text{percentagem de tempo de alarme};$

$$\bullet U = \frac{p}{fa + fs}$$

em que, **p** representa o número médio de sismos previstos, **fa** o número médio de falsos alarme e **fs** o número médio de falhas, valores estes obtidos durante um longo período de tempo de funcionamento do sistema.

No entanto, considerou-se que as três medidas de desempenho inicialmente referidas poderão ser mais úteis à tomada de decisão do gestor do Sistema de Alarme Sísmico. Com efeito, a *percentagem de sismos previstos*, a *percentagem de falsos alarmes* e a *percentagem de tempo de alarme*, são de compreensão imediata para qualquer cidadão comum, ao passo que os quocientes **q** e **U**, não são tão intuitivos.

Admita-se, por exemplo que, dado um cenário sísmico, e o valor da *Sismicidade Local*, durante o período de tempo T0, se sabe que a percentagem de *sismos previstos* é de, respectivamente, 60% e 35%, para os precursores, Condições Iniciais e Sismicidade Local.

Neste exemplo, é fácil concluir que o precursor Condições Iniciais tem melhor desempenho, do que o precursor Sismicidade Local, já que previu um maior número de abalos sísmicos, devendo ter o grau de alarme do primeiro, uma maior contribuição no valor do *Grau de Alarme Sísmico*, do que o grau de alarme do precursor Sismicidade Local. Este processo pode repetir-se para cada precursor utilizado, sendo no entanto, necessário definir a importância, para o gestor do Sistema de Alarme, das medidas de performance utilizadas.

Com efeito, numa dada região com elevado *risco sísmico*, pode interessar essencialmente *prever* os abalos de forte magnitude, mesmo que para tal seja necessário utilizar um elevado *tempo de alarme*.

Contudo, noutra região pode ser totalmente desaconselhável emitir um aviso à população se a probabilidade de ocorrência de um abalo sísmico não for muito grande, ou seja, não será desejável obter uma elevada *percentagem de falsos alarmes*.

Está-se perante um problema de *decisão multicritério*, já que se pretende determinar a “importância” ou a **contribuição relativa de cada precursor**, utilizando-se para isso vários **critérios**: *percentagem de sismos previstos*, *percentagem de falsos alarmes* e *percentagem de tempo de alarme*. A metodologia AHP vai ser aqui aplicada, visto ser um método de análise multicritério de apoio à decisão.

8.2 - Determinação do Grau de Alarme Total

O grau de alarme sísmico, para um período de tempo, numa dada região, deve ser uma combinação linear dos diversos valores de grau de alarme, relativos aos precursores sísmicos utilizados.

O grau de alarme relativo a cada precursor será multiplicado por um factor de ponderação, somando-se os produtos assim obtidos, para todos os precursores utilizados.

Neste trabalho, como se utilizaram apenas os precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, o *Grau de Alarme Total* será dado pela expressão:

$$GA = fp_{CI} \times ga_{CI} + fp_{SL} \times ga_{SL} \quad , \text{ em que:}$$

fp_{CI} representa o factor de ponderação para o grau de alarme do precursor Condições Iniciais;

ga_{CI} representa o grau de alarme do precursor Condições Iniciais;

fp_{SL} representa o factor de ponderação para o grau de alarme do precursor Sismicidade Local;

ga_{SL} representa o grau de alarme do precursor Sismicidade Local.

Os **factores de ponderação**, ou **pesos** são calculados com base nas medidas de desempenho dos precursores, e devem ser tais que, quanto melhor for o desempenho do precursor, maior seja o valor do respectivo factor de ponderação.

Por exemplo, se se considerasse apenas como medida de desempenho a *percentagem de sismos previstos*, e se para os precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, ela apresentasse os valores de, respectivamente, 30% e 15%, não restariam dúvidas de que o precursor Condições Iniciais apresentava um desempenho melhor do que o precursor Sismicidade Local. Neste caso, o cálculo de *Grau de Alarme* seria imediato:

$$GA = 2 / 3 \times ga_{CI} + 1 / 3 \times ga_{SL} .$$

Porém, a percentagem de sismos previstos não é a única medida de desempenho utilizada, pelo que se está perante um problema de **Análise Multicritério**, sendo os critérios as medidas de desempenho dos precursores sísmicos utilizados.

Utilizou-se a metodologia AHP, para determinar factores de ponderação ou pesos a atribuir ao grau de alarme relativo a cada precursor.

Ao aplicar esta metodologia, o **objectivo** é a determinação dos pesos que irão multiplicar o grau de alarme de cada precursor (veja-se figura 8.2.1). Os **critérios** são as medidas de desempenho dos precursores utilizados (nível 2 da hierarquia). O último nível da hierarquia é constituído pelos factores de ponderação de cada um dos precursores sísmicos, cuja determinação constitui o objectivo.

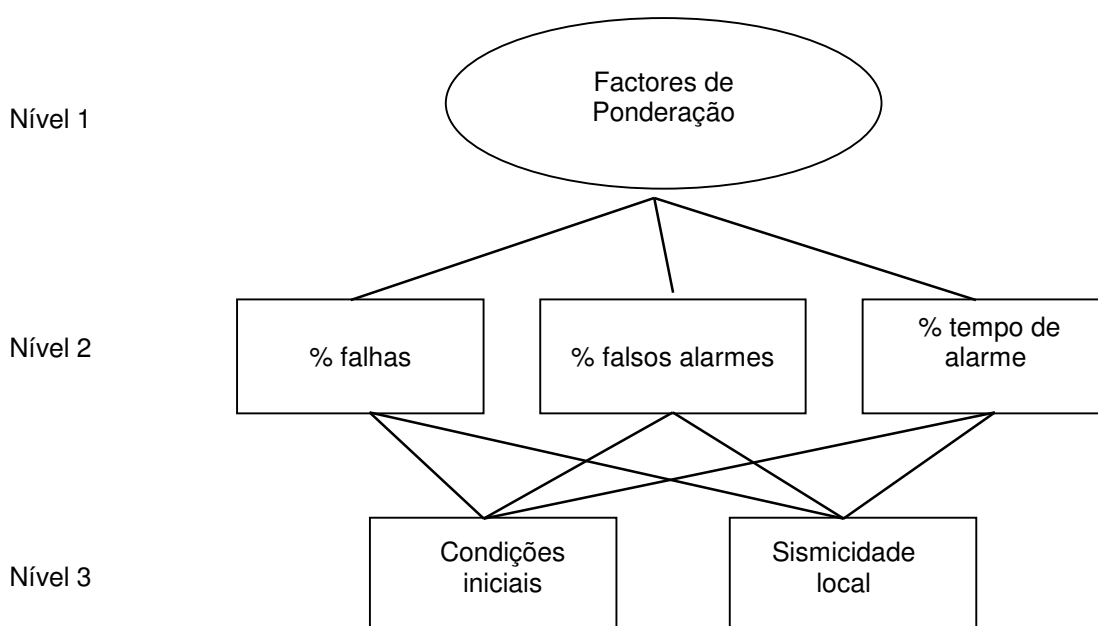


Figura 8.2.1 - Hierarquia representativa da atribuição dos factores de ponderação do grau de alarme relativo a cada precursor

Como se viu anteriormente, nos casos estudados em que o número de sismos observado num intervalo de tempo T_0 (7 ou 15 dias) é superior a três, considerava-se que o grau de alarme relativo ao precursor Sismicidade Local devia ser igual a 100. Porém, ao determinar-se a percentagem de sismos previstos, no caso em que o alarme era accionado quando ocorriam valores de *Sismicidade Local* superiores a três, obteve-se uma reduzidíssima percentagem de sismos previstos (veja-se quadro 7.3.1.2), o que irá implicar baixos valores no factor de ponderação desse precursor. Isto deve-se ao facto de , nesta situação, a *percentagem de tempo de alarme* ser também muito

baixa, o que significa que, só muito raramente estas situações ocorreram efectivamente no processo de ocorrências sísmicas da Península Ibérica.

Por outro lado, quanto maior for o valor de *Sismicidade Local*, maior deverá ser o respectivo grau de alarme. Chega-se assim a uma contradição.

Para contornar esta dificuldade, nos casos em que, o valor de *Sismicidade Local* ultrapassar três, não se deve calcular o valor dos factores de ponderação a partir da medidas de desempenho dos precursores, devendo-se antes efectuar a média aritmética dos valores de grau de alarme encontrados para os dois precursores utilizados. O mesmo se deve fazer no caso do valor de *Sismicidade Local* ser zero.

Analogamente, quando o grau de alarme do precursor Condições Iniciais for 0 ou 100, deve, também efectuar-se a média aritmética dos valores de grau de alarme relativos aos dois precursores.

8.2.1 - Experiências efectuadas

O gestor do Sistema de Alarme Sísmico terá de definir a importância relativa das medidas de desempenho dos precursores sísmicos utilizados.

A definição dessa “importância” depende do gestor do sistema e da região em causa, nomeadamente do seu *risco sísmico*.

Considere-se a comparação das medidas de desempenho, representadas na seguinte *matriz de julgamentos*:

	<i>% falhas</i>	<i>% falsos alarmes</i>	<i>% tempo de alarme</i>
<i>% falhas</i>	1	1	1/3
<i>% falsos alarmes</i>	1	1	1/5
<i>% tempo de alarme</i>	3	5	1

Os valores intervenientes na matriz apresentada referem-se à escala de comparações normalmente utilizada na metodologia AHP (ver quadro 2.1.3.1).

Os valores inscritos nesta matriz são obviamente dependentes do gestor do Sistema de Alarme Sísmico. Posteriormente, será analisada a influência de variações na importância das medidas de desempenho.

Neste caso, para o gestor do Sistema de Alarme, é “mais importante” (ainda que não muito), utilizar um elevado *tempo de alarme* do que *não prever* um sismo. Segundo a escala de comparações utilizada na metodologia AHP, então o elemento (3,1) da *matriz de julgamentos* deve valer 3 (veja-se quadro 2.1.3.1).

Analogamente, se o gestor considera que um *tempo de alarme* elevado é “muito mais importante” do que um *falso alarme*, então segundo a mesma escala, o elemento (3, 2) da *matriz de julgamentos* deve valer 5.

Utilizou-se o software desenvolvido pela “EXPERT CHOICE” para determinar o *vector de prioridades* correspondente à *matriz de julgamentos* anterior, obtendo-se: $[0.185 \quad 0.156 \quad 0.659]^T$, com um Índice de Inconsistência de 0.028 (um valor muito aceitável, já que, segundo Saaty, (Saaty, 1990), os valores de Índice de Inconsistência deverão ser desejavelmente, inferiores a 0.10).

De realçar que os valores obtidos para o vector de prioridades indicam uma “importância” idêntica para as duas primeiras medidas de desempenho (0.185 e 0.156, respectivamente) e um claro destaque, em termos de “importância” da última medida de desempenho (0.659). Assim, o destaque da *percentagem* de *tempo de alarme* indica a disponibilidade do gestor, para tolerar um elevado *tempo de alarme*, na tentativa de evitar a ocorrência de *falhas* ou *falsos alarmes*.

Cada precursor sísmico deve agora ser comparado à luz de cada critério utilizado, neste caso, as medidas de desempenho dos precursores sísmicos. Para tal, dada uma situação sísmica, deve começar-se por determinar o grau de alarme relativo a cada precursor utilizado, bem como os valores das correspondentes medidas de desempenho.

Suponha-se, a título de exemplo, que relativamente à medida de desempenho *percentagem de falhas*, se obteve os valores de 0.50 e 0.25, para os precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, respectivamente. Dado que se pretende um valor de *percentagem de falhas* tão baixo quanto possível, torna-se evidente que, relativamente a esta medida de desempenho, o precursor Sismicidade Local é preferível ao precursor Condições Iniciais.

Face aos valores indicados (0.50 e 0.25) torna-se possível assumir que, relativamente à *percentagem de falhas*, o precursor Sismicidade Local é duas vezes “melhor” do que o precursor Condições Iniciais. Assim, torna-se possível construir a correspondente *matriz de julgamentos*;

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} \text{CI} & \text{SL} \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{CI} \\ \text{SL} \end{array} & \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

(De notar que esta matriz não está agora associada directamente a preferências, mas resulta da comparação de resultados numéricos obtidos).

O *vector de prioridades* correspondente, calculado segundo se explica em (2.1.3) é $[0.667 \ 0.333]^T$, o que revela um melhor desempenho do precursor Condições Iniciais, contrariando aparentemente, os resultados intuitivos. Este facto resulta de agora se estar a comparar valores numéricos resultantes de “erros” (*falhas, falsos alarmes*, etc.).

Como se pretende determinar os factores de ponderação para os graus de alarme relativos a cada precursor, de modo a que, quanto maior for o valor do factor de ponderação, melhor seja o desempenho do precursor em análise, o *vector de prioridades* anteriormente determinado deve ser convertido em $[1 - 0.667 \ 1 - 0.333]^T = [0.333 \ 0.667]^T$, revelando agora um melhor desempenho do precursor Sismicidade Local.



Estudaram-se as 12 situações sísmicas referidas nos capítulos anteriores, e que se reproduzem nos quadros 8.2.1.1 e 8.2.1.2. Recorde-se que 6 ocorreram na região de Lisboa e outras tantas na região da Andaluzia. Estas situações sísmicas foram numeradas de 1 a 6, tendo as duas primeiras precedido sismos de fraca magnitude (magnitude Richter entre 3 e 4) e as restantes precedido sismos de forte magnitude (magnitude Richter superior a 5).

Os quadros 8.2.1.3 e 8.2.1.4 apresentam o grau de alarme e medidas de desempenho dos precursores, já determinadas no capítulo anterior, para as 12 situações sísmicas reais estudadas, que se reproduzem novamente, para facilitar a leitura.

Pretende-se determinar os factores de ponderação para os valores de grau de alarme relativos a cada um dos precursores utilizados, para as 12 situações reais estudadas.

Sit. nº	Data	Condições Iniciais							Sism. Loc.	
		G _i	E _i	Dt		G		E _{i-1}	7 dias	15 dias
				i-2	i-1	i-2	i-1			
1	1988.6680478	1.90	7	0.0013293	0.0036628	2.6	2.9	3	0	0
2	1916.6306371	2.28	1	0.0348360	0.0376271	4.09	3.72	16	0	0
3	1914.7264060	5.37	7	0.0119019	0.1171474	4.93	4.70	4	1	1
4	1941.2822584	5.22	7	0.0010589	0.0260929	4.20	3.62	16	0	0
5	1913.5986658	6.25	1	0.0025114	0.0005969	4.94	3.48	16	0	0
6	1978.2638885	5.10	1	0.0096571	0.0280872	4.30	3.90	3	0	0

Quadro 8.2.1.1 - Situações sísmicas reais experimentadas para a região de Lisboa

Sit. nº	Data	Condições Iniciais							Sism. Loc.	
		G _i	E _i	Dt		G		E _{i-1}	7 dias	15 dias
				i-2	i-1	i-2	i-1			
1	1953.2834951	2.74	2	0.0216391	0.0151964	4.56	3.98	16	1	1
2	1991.2582397	2.9	3	0.0080164	0.0089478	2.8	3.5	4	0	0
3	1953.3443953	5.39	2	0.0028980	0.0000309	3.83	3.6	2	1	2
4	1975.5990304	5.20	3	0.0104650	0.0043332	3.46	3.6	9	1	1
5	1956.3068978	5.15	3	0.0001817	0.0000114	3.21	2.9	3	9	9
6	1984.6999738	5.00	3	0.0030389	0.0016706	2.5	4.1	2	3	6

Quadro 8.2.1.2 - Situações sísmicas reais experimentadas para a região da Andaluzia

As medidas de desempenho do precursor Condições Iniciais foram determinadas em 7.2 (ver quadros 7.2.1.1 e 7.2.1.2). As mesmas medidas do precursor Sismicidade Local foram calculadas em 7.3 (ver quadros 7.3.1.1 e 7.3.1.2)

T0	Situação nº	Condições Iniciais				Sismicidade Local			
		% falhas	% f.alarmes	% t. alarme	ga _{CI}	% falhas	% f.alarmes	% t. alarme	ga _{SL}
7 dias	1	62.9	51.0	19.2	49.9	-	-	-	11.6
	2	71.9	49.4	16.3	47.7	-	-	-	11.6
	3	79.7	73.1	7.4	87.7	87.9	96.9	8.6	49.9
	4	87.1	77.6	6.5	49.9	-	-	-	11.6
	5	83.9	78.2	8.0	87.8	-	-	-	11.6
	6	54.3	33.7	30.6	49.9	-	-	-	11.6
15 dias	1	50.8	34.3	32.2	88.0	-	-	-	11.6
	2	56.4	38.9	27.7	53.5	-	-	-	11.6
	3	72.2	60.5	14.4	88.0	78.7	94.1	16.8	49.9
	4	79.5	66.3	12.6	87.6	-	-	-	11.6
	5	73.2	66.5	15.9	88.1	-	-	-	11.6
	6	38.7	21.4	46.5	50.0	-	-	-	11.6

Quadro 8.2.1.3 - Grau de alarme e medidas de desempenho dos precursores, para as situações sísmicas reais estudadas na região de Lisboa

T0	Situação nº	Condições Iniciais				Sismicidade Local			
		% falhas	% f.alarmes	% t. alarme	ga _{CI}	% falhas	% f.alarmes	% t. alarme	ga _{SL}
7 dias	1	76.4	44.3	13.1	53.0	48.0	88.1	37.0	49.9
	2	63.3	35.7	23.2	50.4	-	-	-	11.6
	3	93.8	66.0	2.1	49.9	48.0	88.1	37.0	49.9
	4	68.7	65.2	15.5	88.0	48.0	88.1	37.0	49.9
	5	85.7	41.7	6.0	81.1	-	-	-	100
	6	86.4	69.9	5.9	87.9	84.7	85.5	8.9	88.2
15 dias	1	64.0	32.9	23.1	48.3	32.2	80.0	56.7	49.9
	2	47.4	21.2	38.1	50.6	-	-	-	11.6
	3	90.4	54.2	4.4	88.1	55.6	79.0	35.4	88.1
	4	55.0	44.8	29.7	88.1	32.2	80.0	56.7	49.9
	5	78.8	33.5	11.5	87.9	-	-	-	100
	6	79.1	57.1	12.2	88.1	-	-	-	100

Quadro 8.2.1.4 - Grau de alarme e medidas de desempenho dos precursores, para as situações sísmicas reais estudadas na região da Andaluzia

Para o cálculo dos valores dos factores de ponderação relativos aos precursores utilizados foi utilizado o software desenvolvido pela “EXPERT CHOICE”. No entanto, para melhor compreensão do processo, exemplifica-se o cálculo dos referidos factores, para situação número 3 da região da Andaluzia, T0 = 15 dias.

Para a situação que se exemplifica, a partir das medidas de desempenho relativas aos dois precursores utilizados (veja-se quadros 8.2.1.3 e 8.2.1.4), obtiveram-se as seguintes *matrizes de julgamentos*, e respectivos *vectores de prioridades* - v.p. (já corrigidos):

	% Falhas			% Falsos alarmes			% Tempo de Alarme	
	CI	SL		CI	SL		CI	SL
CI	$\begin{bmatrix} 1 & 1.626 \\ 0.615 & 1 \end{bmatrix}$		CI	$\begin{bmatrix} 1 & 0.681 \\ 1.458 & 1 \end{bmatrix}$		CI	$\begin{bmatrix} 1 & 0.124 \\ 8.065 & 1 \end{bmatrix}$	
SL			SL			SL		
v. p.	[0.3808 0.6192] ^T			[0.5931 0.4069] ^T			[0.8897 0.1103] ^T	

O cálculo dos factores de ponderação relativos aos precursores utilizados é feito, multiplicando a matriz cujas colunas são os vectores de prioridades transpostos, relativos a cada medida de desempenho, pelo vector de prioridades relativo às medidas de desempenho, anteriormente calculado ($[0.185 \ 0.156 \ 0.659]^T$).

$$\begin{array}{ccc}
 \text{falhas} & \text{f. alarmes} & \text{t. alarme} \\
 \begin{bmatrix} 0.3808 & 0.5931 & 0.8897 \\ 0.6192 & 0.4069 & 0.1103 \end{bmatrix} & \times & \begin{bmatrix} 0.185 \\ 0.156 \\ 0.659 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0.749} \\ \mathbf{0.251} \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Os factores de ponderação relativos aos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local são, respectivamente, 0.749 e 0.251, o que revela, neste caso, um melhor desempenho do precursor Condições Iniciais.

Para as restantes situações, os cálculos são análogos, tendo-se utilizado o software da EXPERT CHOICE para os efectuar.

Os quadros 8.2.1.5 e 8.2.1.6 apresentam o grau de alarme de cada precursor, respectivos factores de ponderação, e o Grau de Alarme Total (GA). A última coluna, apresenta a classificação da situação sísmica de acordo com o seguinte critério:

$GA \in [0, 40]$ - ausência de alarme ou vigilância (situação normal);

$GA \in [30, 70]$ - vigilância;

$GA \in [60, 100]$ - alarme ;

Sit. nº	fpCI	gaCI	fpSL	gaSL	GA	situação
1	0.5	49.9	0.5	11.6	30.8	norm./vig.
2	0.5	47.7	0.5	11.6	29.7	normal
3	0.541	87.7	0.459	49.9	70.3	alarme
4	0.5	49.9	0.5	11.6	30.8	norm./vig.
5	0.5	87.8	0.5	11.6	49.7	vig.
6	0.5	49.9	0.5	11.6	30.8	norm./vig.
1	0.5	88.0	0.5	11.6	49.8	vig.
2	0.5	53.5	0.5	11.6	32.6	norm./vig.
3	0.547	88.0	0.453	49.9	70.7	alarme
4	0.5	87.6	0.5	11.6	49.6	vig.
5	0.5	88.1	0.5	11.6	49.9	vig.
6	0.5	50.0	0.5	11.6	30.8	norm./vig.

Quadro 8.2.1.5 - *Grau de Alarme Total* para as situações reais estudadas na região de Lisboa

Sit. nº	fpCI	gaCI	fpSL	gaSL	GA	situação
1	0.662	53.0	0.338	49.9	52.0	vig.
2	0.5	50.4	0.5	11.6	31.0	norm./vig.
3	0.775	49.9	0.225	49.9	49.9	vig.
4	0.630	88.0	0.370	49.9	73.9	alarme
5	0.5	81.1	0.5	100	90.6	alarme
6	0.574	87.9	0.426	88.2	85.6	alarme
1	0.641	48.3	0.359	49.9	48.9	vig.
2	0.5	50.6	0.5	11.6	31.1	vig.
3	0.749	88.1	0.251	88.1	92.1	alarme
4	0.601	88.1	0.399	49.9	72.9	alarme
5	0.5	87.9	0.5	100	94.0	alarme
6	0.5	88.1	0.5	100	94.1	alarme

Quadro 8.2.1.6 - *Grau de Alarme Total* para as situações reais estudadas na região da Andaluzia

8.2.2 - Análise de resultados

Os quadros 8.2.1.5 e 8.2.1.6 permitem concluir o seguinte:

- Em todos os casos estudados, o factor de ponderação do precursor Condições Iniciais é maior ou igual ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local. Estes resultados indicam que, nos casos estudados, o precursor Condições Iniciais apresenta melhor desempenho do que o precursor Sismicidade Local.
- A região da Andaluzia apresenta melhores resultados, já que, as situações sísmicas números 3 a 6, que precederam sismos de forte magnitude apresentam sempre um *Grau de Alarme* correspondente a uma situação de alarme, exceptuando-se a situação número 3, para horizontes temporais de 7 dias, que apresenta uma situação de vigilância.
- As situações números 1 e 2, da região da Andaluzia, indicam tratar-se de uma situação sísmica normal ou de vigilância, o que está correcto, visto terem precedido sismos de fraca magnitude.
- Na região de Lisboa os resultados não são tão satisfatórios, visto que as situações números 3 a 6 apresentam um *Grau de Alarme* inferior ao que seria de desejar. Por exemplo, a situação número 5, que precedeu um sismo de magnitude 6.25, apresenta um *Grau de Alarme* que, de acordo com a classificação adoptada, indica tratar-se apenas de uma situação de vigilância.
- A diferença de resultados observada nas duas regiões estudadas, tem provavelmente como causa, a diferença de dados disponíveis para as duas regiões (ver quadro 2.2.2).

Estes resultados foram obtidos, admitindo a comparação das medidas de desempenho, apresentadas anteriormente, e que se traduziram no *vector de prioridades* já calculado ($[\begin{smallmatrix} 0.185 & 0.156 & 0.659 \end{smallmatrix}]^T$). Mas o que acontecerá se essa comparação for diferente?

8.2.2.1- Análise de Sensibilidade

O software utilizado, permite efectuar uma **Análise de Sensibilidade**, que possibilita verificar as alterações nos factores de ponderação, quando se altera a prioridade dos critérios (medidas de performance, neste caso).

Recorde-se que, o *vector de prioridades* relativo às medidas de desempenho (critérios da metodologia AHP) é o seguinte:

$$\begin{matrix} \% \text{ falhas} & \% \text{ falsos alarmes} & \% \text{ tempo de alarme} \\ [0.185 & 0.156 & 0.659]^T \end{matrix}$$

A Análise de Sensibilidade foi efectuada com o auxílio do software “EXPERT CHOICE”, pelo método do gradiente.

As figuras seguintes apresentam a Análise de Sensibilidade, relativa ao objectivo (calcula dos valores dos factores de ponderação), para os critérios: *percentagem de falhas*, *percentagem de falsos alarmes* e *percentagem de tempo de alarme*.

Nos gráficos relativos à Análise de Sensibilidade efectuada, a prioridade do critério em análise é representada pela intersecção da linha vertical com o eixo das abcissas. As intersecções da linha vertical com as oblíquas (relativas aos precursores Condições Iniciais - CI e Sismicidade Local - SL) representam as correspondentes prioridades.

Por exemplo, na região de Lisboa, para um horizonte temporal de 7 dias, e para a situação sísmica nº 3, os factores de ponderação para o grau de alarme do precursor Condições Iniciais e Sismicidade Local são, respectivamente, 0.541 e 0.459. Na figura 8.2.2.1.1 as intersecções da linha vertical com as oblíquas indicam precisamente estes valores. A prioridade da percentagem de falhas é de 0.185, que é representada pela intersecção da linha vertical com o eixo das abcissas.

Se se deslocar a linha vertical, para a esquerda ou para a direita (ou seja, neste caso fazer variar a prioridade da percentagem de falhas), as suas intersecções com as linhas oblíquas indicarão as novas prioridades obtidas, permitindo assim efectuar a Análise de Sensibilidade pretendida, nomeadamente, verificar se existe alteração na dominância dos pesos envolvidos.

Apresenta-se em seguida os resultados da Análise de Sensibilidade relativamente ao critério *percentagem de falhas*, correspondentes à situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias.

Observando a figura 8.2.2.1.1, verifica-se que, qualquer que seja a prioridade da *percentagem de falhas*, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da *percentagem de falhas* aumenta, os valores dos factores de ponderação tendem a aproximar-se, diminuindo a diferença nos factores de ponderação do grau de alarme dos dois precursores, ou seja, aproximando-se o resultado do *Grau de Alarme* do que seria obtido efectuando simplesmente a média aritmética dos valores de grau de alarme dos dois precursores.

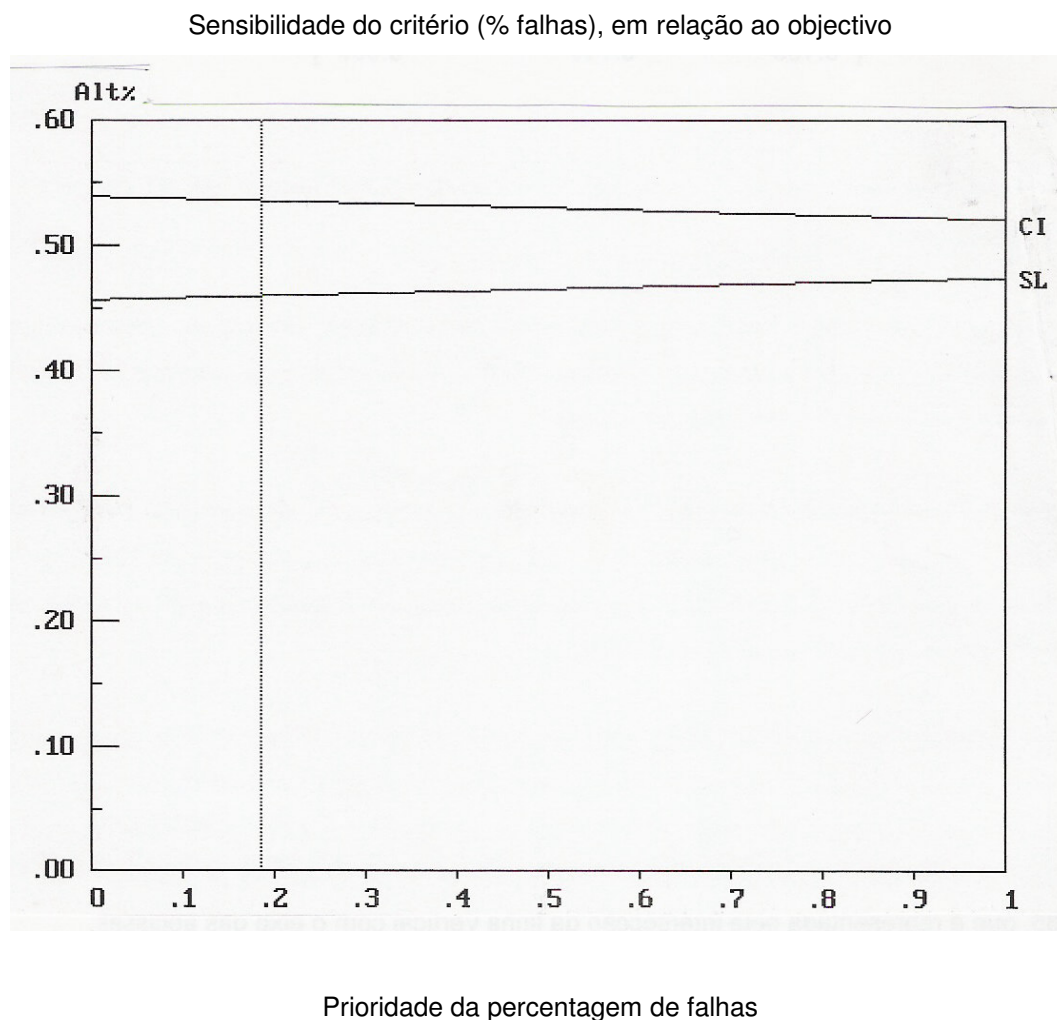


Figura 8.2.2.1.1 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de falhas

No Anexo A apresenta-se os resultados das Análises de Sensibilidade levadas a cabo para as demais situações sísmicas.

No quadro 8.2.2.1.1 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos nas referidas Análises de Sensibilidade.

T0	Sit. nº	Lisboa			Andaluzia		
		% falhas	% f. alarm.	% t. alarme	% falhas	% f. alarm.	% t. alarme
7 dias	1	—	—	—	•	••	••
	2	—	—	—	—	—	—
	3	••	••	••	•	••	•
	4	—	—	—	•	••	•
	5	—	—	—	—	—	—
	6	—	—	—	•	••	••
15 dias	1	—	—	—	•	••	••
	2	—	—	—	—	—	—
	3	••	••	••	•	••	•
	4	—	—	—	•	••	•
	5	—	—	—	—	—	—
	6	—	—	—	—	—	—

Legenda:

- factor de ponderação do precursor Condições Iniciais superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, para **qualquer** valor de prioridade do critério em causa
- factor de ponderação do precursor Condições Iniciais superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, para **alguns** valores de prioridade do critério em causa
- não se aplica

Quadro 8.2.2.1.1 - Síntese de resultados obtidos na Análise de Sensibilidade efectuada

O quadro 8.2.2.1.1 sintetiza os resultados obtidos, verificando-se que, nas situações estudadas, apenas na região de Lisboa o factor de ponderação do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, para qualquer valor de prioridade dos três critérios utilizados.

É curioso verificar que, nas situações estudadas, na região da Andaluzia, para a medida de desempenho *percentagem de falhas*, o factor de ponderação do precursor Condições Iniciais apenas é superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, para **alguns** valores de prioridade do critério em causa, ao passo que, na mesma região, para a medida de desempenho *percentagem de falsos alarmes*, o factor de ponderação do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, para quaisquer valores de prioridade do critério em causa.

8.3 - Conclusão

Apresentou-se uma metodologia que permite determinar o *Grau de Alarme Sísmico*, para uma região, durante um horizonte temporal.

O *Grau de Alarme Sísmico* é calculado a partir de uma média pesada dos valores de grau de alarme dos dois precursores sísmicos: Condições Iniciais e Sismicidade Local .

O cálculo dos pesos da referida média é efectuado com recurso à metodologia AHP, sendo os critérios as medidas de desempenho dos precursores sísmicos.

Desta forma consegue-se que, quanto melhor for o desempenho de um precursor, maior seja o seu peso no grau de alarme total.

Determinou-se o *Grau de Alarme Total* para 12 situações sísmicas reais ocorridas na Península Ibérica, tendo-se efectuado as correspondentes Análises de Sensibilidade.

Capítulo 9

CONCLUSÃO

9.1 - Introdução

Foi apresentado um Sistema de Alarme Sísmico baseado nos precursores *Sismicidade Local* e *Condições Iniciais* do modelo de simulação utilizado para reproduzir o processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica.

Não foi possível, por insuficiência de dados disponíveis, incorporar, no Sistema de Alarme Sísmico precursores de natureza Geofísica ou Geotectónica.

De referir que o Sistema de Alarme Sísmico, tal como foi concebido, pode permitir, com as devidas adaptações, a introdução de outros precursores sísmicos.

As análises desenvolvidas envolvem a concepção de um Sistema de Controlo Vago associado a cada precursor (Condições Iniciais e Sismicidade Local), a simulação do processo estocástico sísmico na Península Ibérica (PESPI) e o recurso à metodologia AHP para permitir a determinação do Grau de Alarme Total.

A figura 9.1.1 esquematiza a concepção do Sistema de Alarme Sísmico referido.

Considera-se que, embora o Sistema de Alarme Sísmico concebido encerre várias potencialidades (que serão abordadas em 9.3), existem algumas limitações que devem ser tidas em conta (veja-se 9.2). Refira-se finalmente, que, em geral, cada limitação pode estar na base de um possível desenvolvimento futuro (veja-se 9.4).

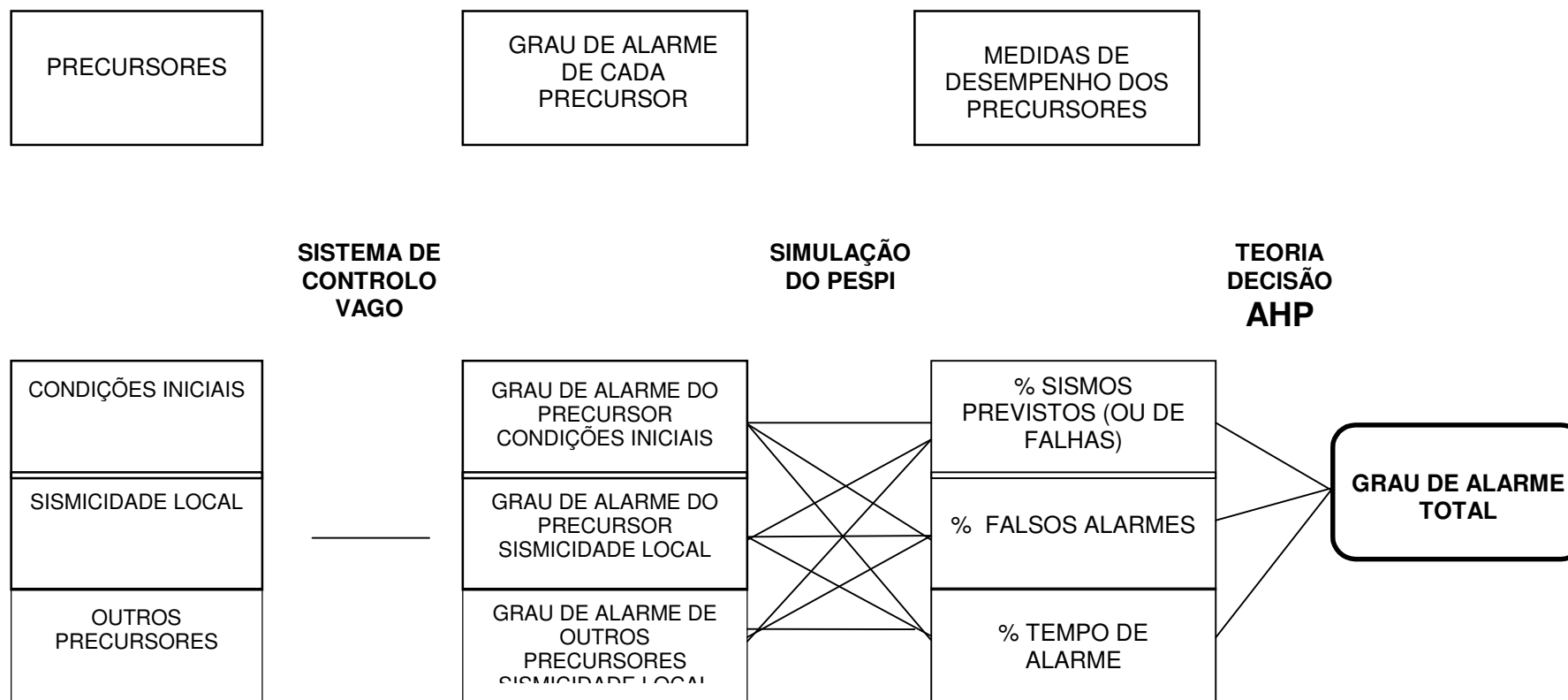


Figura 9.1.1 - Representação global do Sistema de Alarme Sísmico, com referência às metodologias utilizadas

9.2 - Limitações

Uma primeira limitação desta Dissertação diz respeito aos dados utilizados. Com efeito, do catálogo utilizado (Sousa, Martins e Oliveira, 1992), apenas se utilizaram dados correspondentes ao período de tempo posterior a 1900, devido à grande heterogeneidade dos dados anteriores a este século.

Outra limitação da abordagem seguida tem como génese o próprio modelo de geração do processo de ocorrências sísmicas adoptado. Costa (Costa, 1989) refere algumas dessas limitações, nomeadamente, as que decorrem do facto de não se ter filtrado o catálogo sísmico utilizado de fenómenos premonitórios nem de réplicas, tendo-se utilizado apenas a informação do catálogo de ocorrências sísmicas correspondente ao período posterior a 1900.

A utilização de distribuições empíricas para proceder à geração dos factores Tempo e Grandeza, no modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas adoptado, constitui também uma limitação, especialmente na análise de extremos.

O Sistema de Alarme Sísmico apresentado nesta Dissertação reveste-se também de alguma complexidade, especialmente na determinação do grau de alarme relativo a cada precursor sísmico. Como se pode observar nos capítulos 5 e 6, a construção dos Sistemas de Controlo Vago, que permitem determinar o grau de alarme para os precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, respectivamente, não é imediata.

Conforme se referiu nos capítulos 3 e 4, os precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local diminuem a sua influência ao fim de algum tempo, o que implica que um sistema de alarme baseado nestes precursores não possa ser accionado por horizontes temporais superiores a alguns meses.

Como já foi referido não existe, na Península Ibérica, informação relativa a precursores cuja influência se mantenha por mais tempo, como é o caso, por exemplo, das concentrações de Radão nas águas de poços profundos, pelo que, de momento o horizonte temporal do Sistema de Alarme concebido não pode exceder alguns meses.

Outra limitação diz respeito à natureza discreta do factor Espaço. Costa (Costa, 1989) simplificou o carácter bidimensional do Espaço ao reduzir este factor a 21 *zonas sísmicas* na Península Ibérica.

Não podendo, pela natureza do factor Espaço, definir-se um conceito de “média”, considerou-se na presente Dissertação, a dicotomia “pertença/não pertença à região em estudo”, sendo cada região estudada, um agrupamento de duas das 21 *zonas sísmicas*.

Seria desejável desenvolver o conceito de “região vizinha”, já que, no caso de sismos de forte magnitude, não só a região epicentral, como a(s) contígua(s) são normalmente afectadas.

Relativamente à aplicação da metodologia AHP, esta é feita em duas situações distintas: comparação de cenários sísmicos (*condições iniciais*) e na determinação da atribuição dos factores de ponderação para os valores de grau de alarme relativos a cada precursor.

Na primeira aplicação referida desta metodologia, considera-se que o pressuposto de independência entre as características comparadas (num dado nível), subjacente a esta metodologia, nem sempre é tido em conta, especialmente aquando da comparação da influência de *condições iniciais* geradas aleatoriamente (veja-se 3.3). Porém, o pressuposto de independência entre as características comparadas não é tido em conta em muitas aplicações práticas (veja-se o exemplo apresentado por Saaty (Saaty, 1990), pág. 128). Na comparação de cenários sísmicos, a própria natureza do fenómeno físico envolvido, não permite afirmar, nem rejeitar, linearmente a verificação do referido pressuposto

9.3 - Potencialidades

O Sistema de Alarme Sísmico apresentado permite, face a uma situação sísmica dada, avaliar o grau de alarme, ou o “grau de preocupação”, para uma região, durante um horizonte temporal.

Face a uma situação sísmica concreta, é possível avaliar o grau de preocupação, e eventualmente, tomar decisões. Estas devem estar relacionadas com o *risco sísmico* da região em causa. Isto é, em função das características particulares da região em estudo, como sejam a existência de estruturas de risco tais como centrais nucleares, barragens, etc., decidir as medidas a tomar.

Espera-se que, futuramente, seja possível incorporar no Sistema de Alarme Sísmico outros precursores. Com efeito, será necessário determinar o grau de alarme relativamente a cada um desses precursores e “combina-los” de modo a obter o grau de Alarme Sísmico Total.

De notar que na presente Dissertação se utiliza a metodologia AHP num contexto bem diverso do original (apoio multicritério à decisão), permitindo assim o alargamento desta metodologia a outros domínios.

Refira-se ainda que, no capítulo 3 (veja-se 3.2), se apresenta uma metodologia que permite comparar cenários sísmicos (mesmo sem determinar o grau de alarme que lhes está associado) e estimar a probabilidade de ocorrência de um sismo de forte magnitude, num horizonte temporal, na região em estudo, correspondente a cada um dos cenários e, consequentemente, verificar qual, ou quais o(s) mais preocupante(s).

Num contexto mais geral, a metodologia apresentada em (3.3) permite também estudar a influência dos factores Tempo, Grandeza e Espaço, no processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica, utilizando para o efeito condições *iniciais geradas* aleatoriamente, dentro de certos intervalos.

9.4 - Desenvolvimentos

Relativamente ao factor Espaço poder-se-á introduzir o conceito de “região vizinha” pelo que, em lugar da dicotomia referida, se teria três situações: “pertença à região em estudo”, “pertença à região vizinha” e “não pertença à região em estudo ou à sua vizinhança”. Esta abordagem permitiria uma análise mais fina (embora significativamente mais complexa) deste factor.

O Sistema de Alarme Sísmico proposto, pode permitir, com as devidas adaptações, a introdução de outros precursores sísmicos.

No caso de se construir um Sistema de Alarme com n precursores, o grau de alarme total seria dado por:

$$GA = \sum_{i=1}^n fp_i \cdot ga_i$$

em que fp_i representa o factor de ponderação do precursor i e ga_i representa o grau de alarme do precursor i .

De referir que, ao aplicar esta última fórmula, se teria de ter em conta o horizonte temporal, em que cada precursor exerce influência no processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica. Se, por exemplo, o horizonte temporal considerado fosse de 15 dias, seria de englobar os precursores que tivessem influência, no processo de ocorrências sísmicas, no horizonte temporal considerado, como, por exemplo, os precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local. Mas para um precursor que só exercesse influência expressiva ao fim de, por exemplo um ano, não seria possível incorporá-lo no Sistema de Alarme Sísmico, durante este horizonte temporal. Este último precursor deveria ter, na referida fórmula, um valor de grau de alarme igual a zero.

Outros possíveis desenvolvimentos prendem-se com o próprio modelo de simulação do processo de ocorrências na Península Ibérica utilizado (Costa, 1989). Neste modelo, para gerar os valores de Dt , G e E , utilizaram-se distribuições empíricas. Um possível desenvolvimento seria o de ajustar às referidas distribuições empíricas distribuições estatísticas, o que possibilitaria, a realização de análises de extremos.

Também, como já foi referido, a introdução do conceito de “região vizinha” poderia melhorar o Sistema de Alarme Sísmico proposto. Neste caso, seria possível estudar o efeito de um abalo sísmico, nas regiões contíguas àquela onde ocorreu o epicentro. Neste caso, seria necessário utilizar a *lei de atenuação*, já que, na região agora em estudo, a intensidade de um sismo será menor do que a registada na região epicentral.

Nesta Dissertação, as *zonas sísmicas* utilizadas, foram “suavizadas”, relativamente às originalmente propostas por Costa (Costa, 1989). Um desenvolvimento possível seria a utilização da Teoria dos Conjuntos Vagos para a definição das zonas sísmicas na Península Ibérica.

O Sistema de Alarme Sísmico apresentado nesta Dissertação, além de permitir utilizar outros precursores sísmicos, deverá encorajar a monitorização de fenómenos sísmicos, com vista à criação de um Sistema de Alarme Sísmico mais alargado.



Apesar dos esforços de Cientistas de todo o Mundo no estudo do fenómeno sísmico, ele continua a causar, um pouco por toda a parte, vítimas e estragos. No entanto, todos os contributos para a previsão do fenómeno sísmico e, consequentes Sistemas de Alarme são importantes porque, em todas as Ciências, são os “pequenos passos” que abrem caminho para descobertas maiores.

ANEXO A

• Situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias

Critério: Percentagem de falsos alarmes

A figura A.1 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falsos alarmes, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falsos alarmes aumenta, os valores dos factores de ponderação tendem a afastar-se, o que indica aumentar a diferenciação dos valores dos pesos.

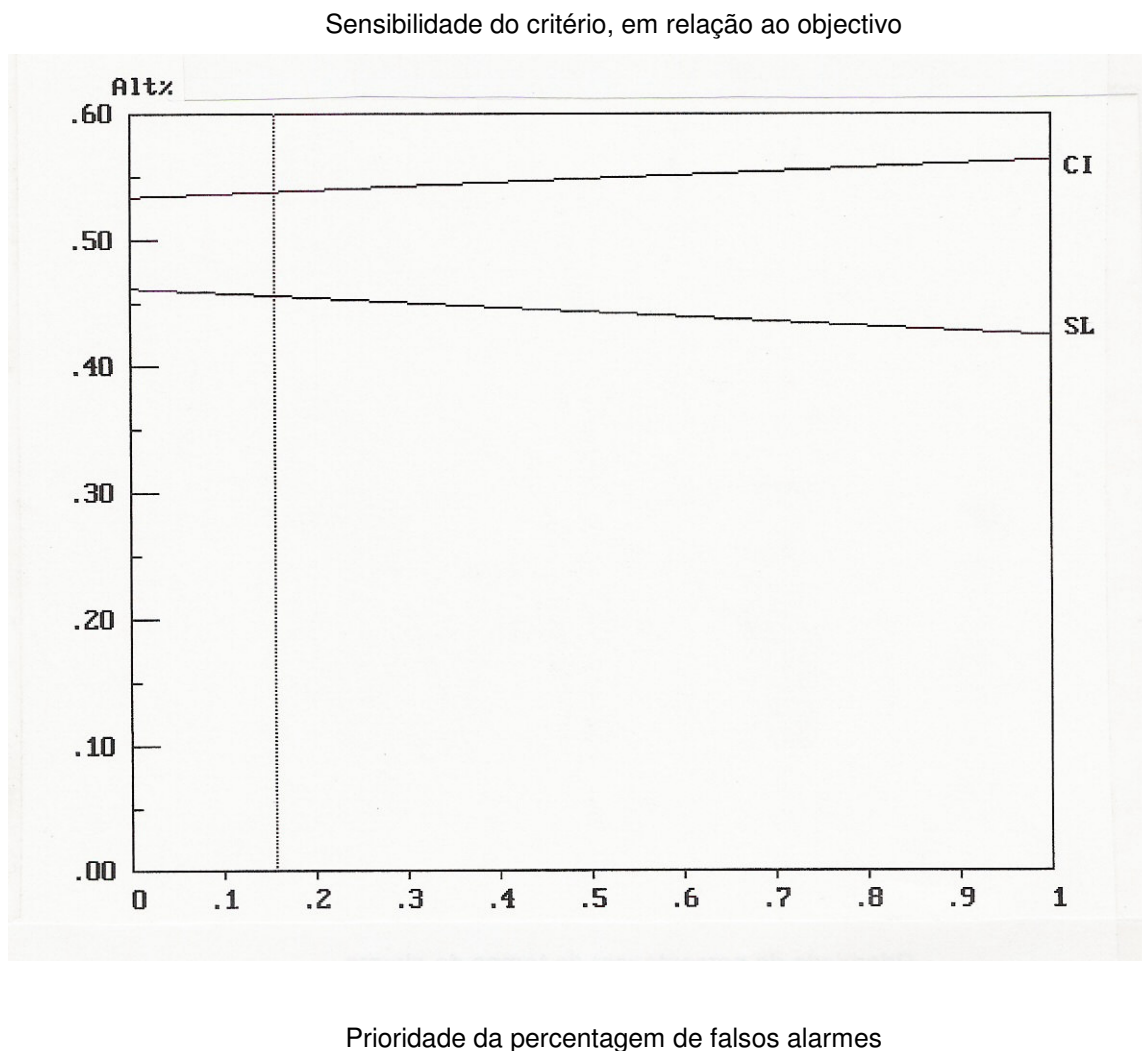
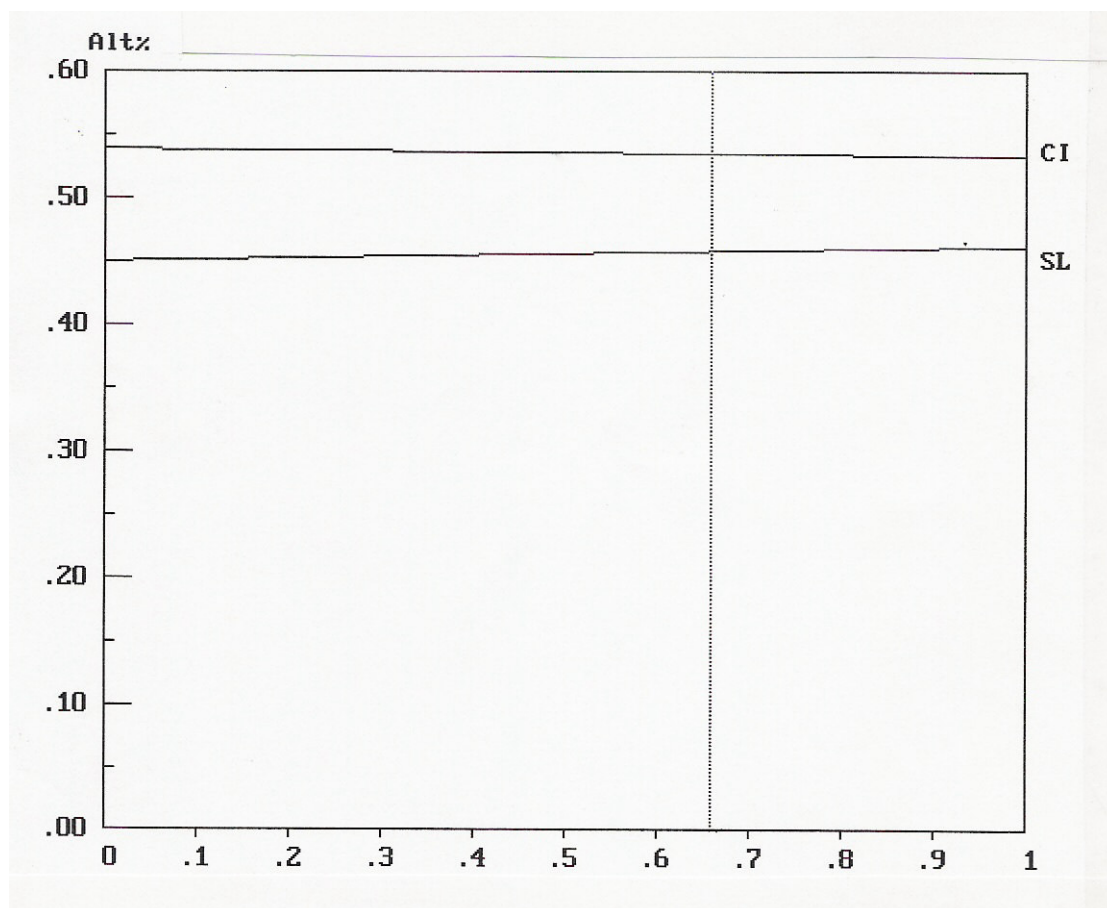


Figura A.1 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério: Percentagem de tempo de alarme

A figura A.2 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de tempo de alarme, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local. A variação do valor da prioridade da percentagem de tempo de alarme pouco se faz sentir nos valores dos factores de ponderação.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



Prioridade da percentagem de tempo de alarme

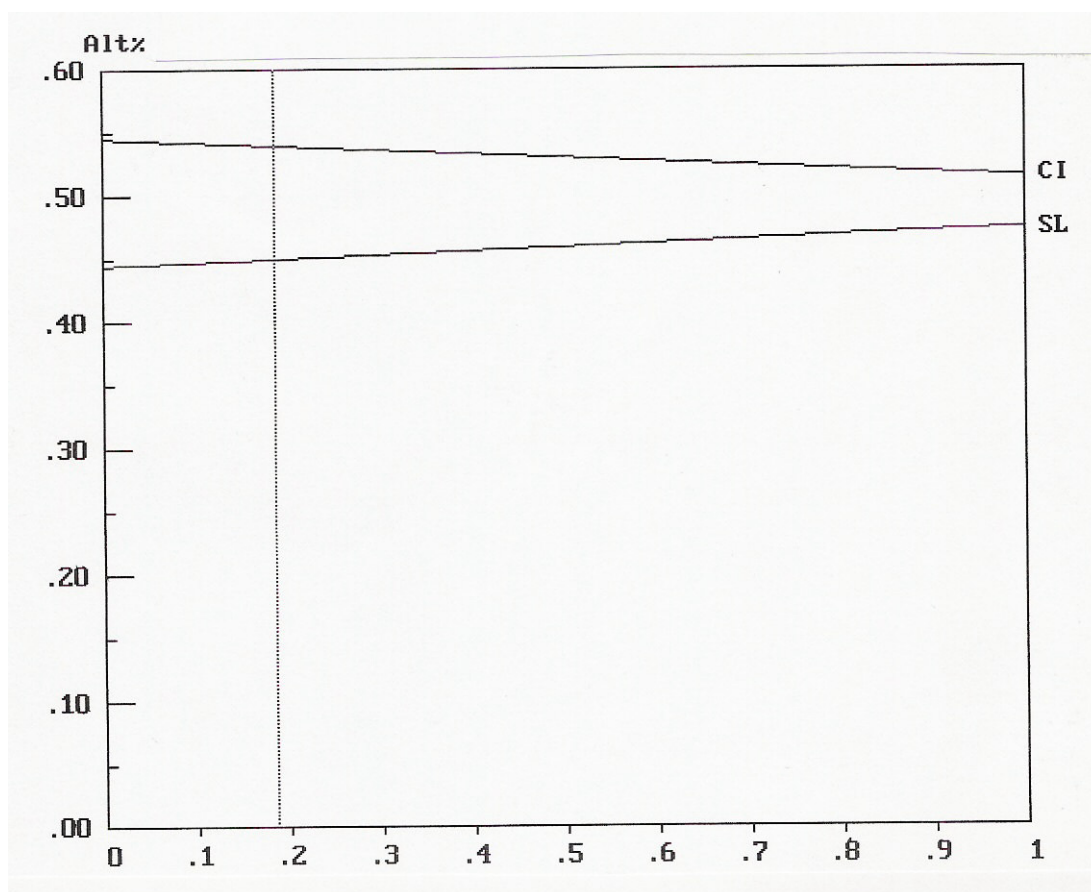
Figura A.2 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

• Situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 15$ dias

Critério: Percentagem de falhas

O gráfico apresentado na figura A.3 apresenta um comportamento idêntico ao da figura 8.2.2.1, permitindo verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falhas, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falhas aumenta, os valores dos factores de ponderação aproximam-se.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



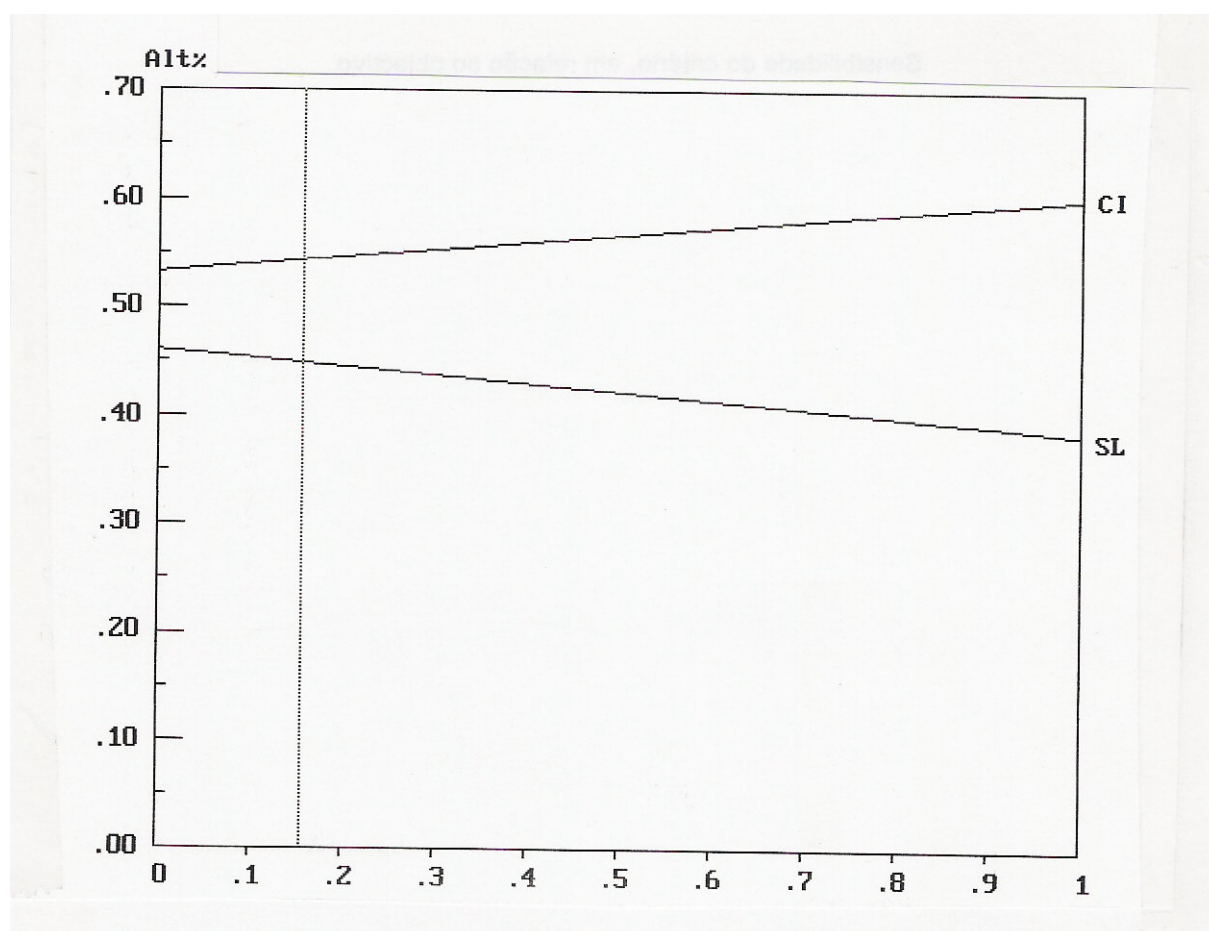
Prioridade da percentagem de falhas

Figura A.3 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 15$ dias, para o critério percentagem falhas

Critério: Percentagem de falsos alarmes

O gráfico apresentado na figura A.4 apresenta um comportamento idêntico ao da figura A.1, dispensando comentários.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo

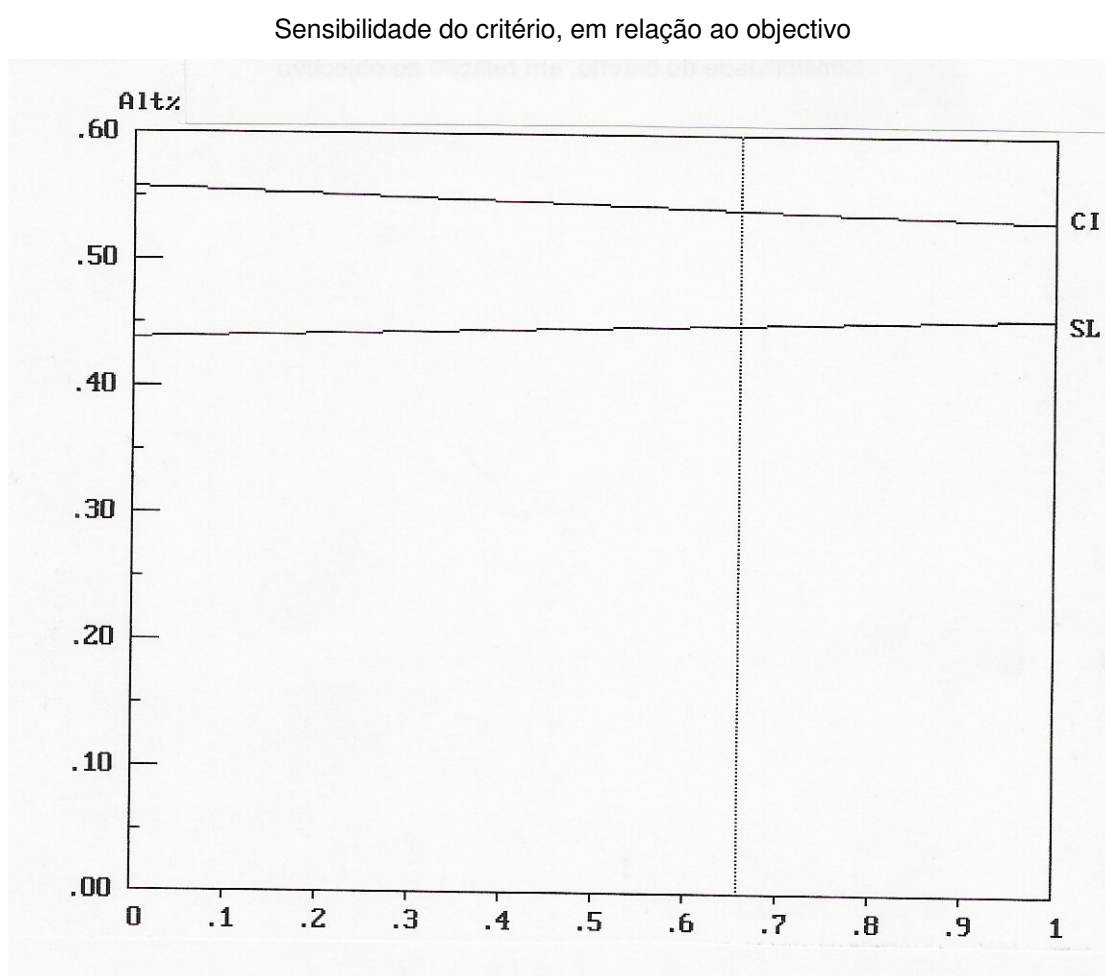


Prioridade da percentagem de falsos alarmes

Figura A.4 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério : Percentagem de tempo de alarme

O gráfico apresentado na figura A.5 apresenta um comportamento idêntico ao da figura A.2, notando-se agora uma variação ligeiramente superior nos valores dos factores de ponderação, que tendem a aproximar-se quando a prioridade da percentagem de tempo de alarme aumenta.



Prioridade da percentagem de tempo de alarme

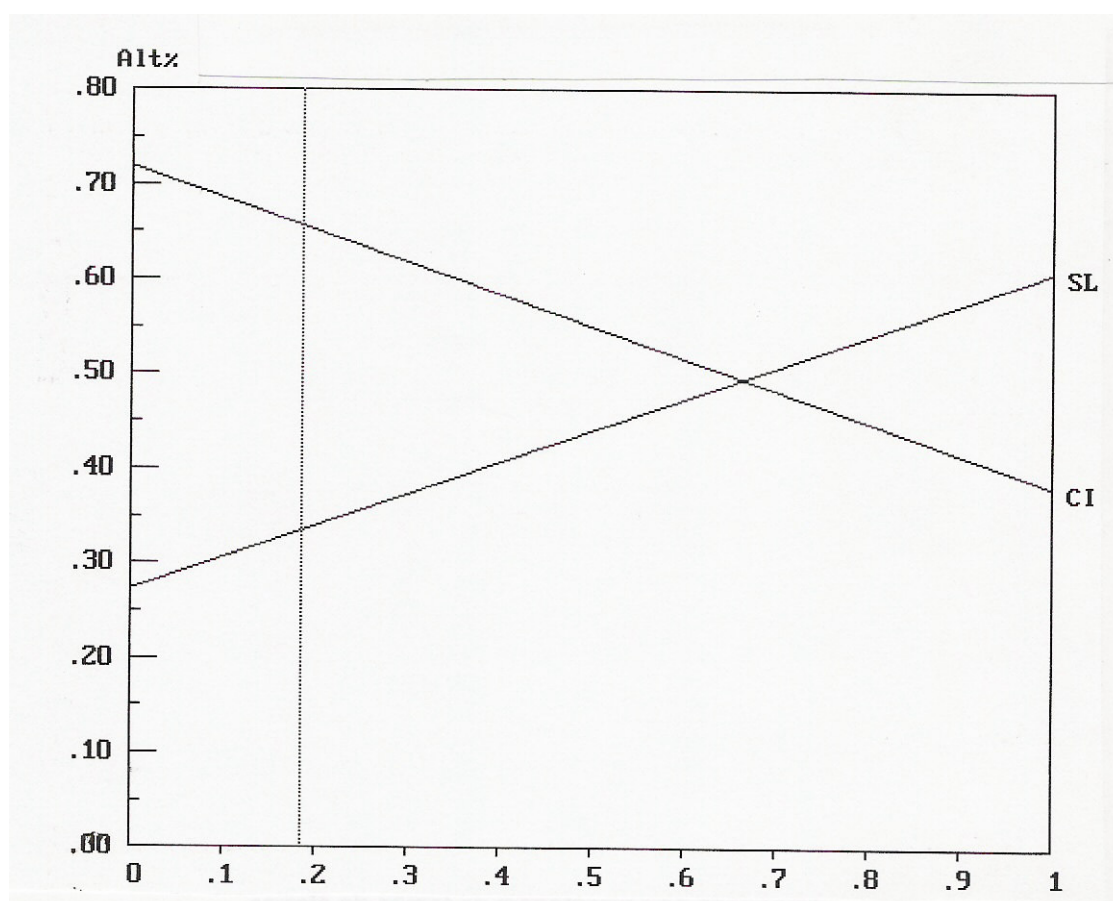
Figura A.5 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região de Lisboa, $T_0 = 15$ dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

• Situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias

Critério: Percentagem de falhas

Como se pode ver na figura A.6, para valores de prioridade da percentagem de falhas até, aproximadamente, 0.65 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, passando-se o contrário a partir desse valor. Contrariamente aos casos anteriores, a predominância dos valores dos factores de ponderação, varia com a “importância” atribuída à medida de desempenho, neste caso a percentagem de falhas.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



Prioridade da percentagem de falhas

Figura A.6 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de falhas

Critério: Percentagem de falsos alarmes

A figura A.7 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falsos alarmes, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre bastante superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local. A variação do valor da prioridade da percentagem de falsos alarmes pouco se faz sentir nos valores dos factores de ponderação.

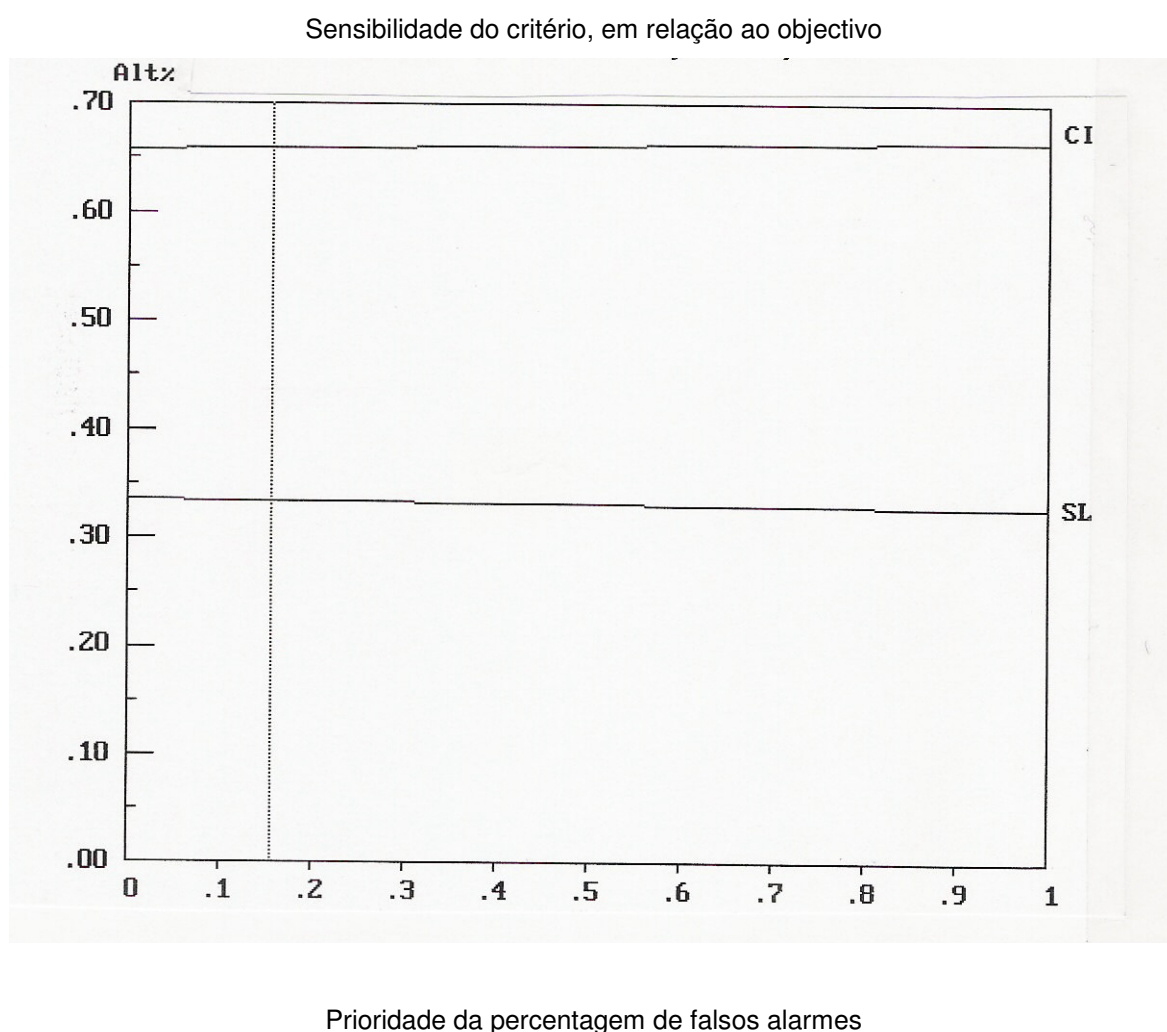
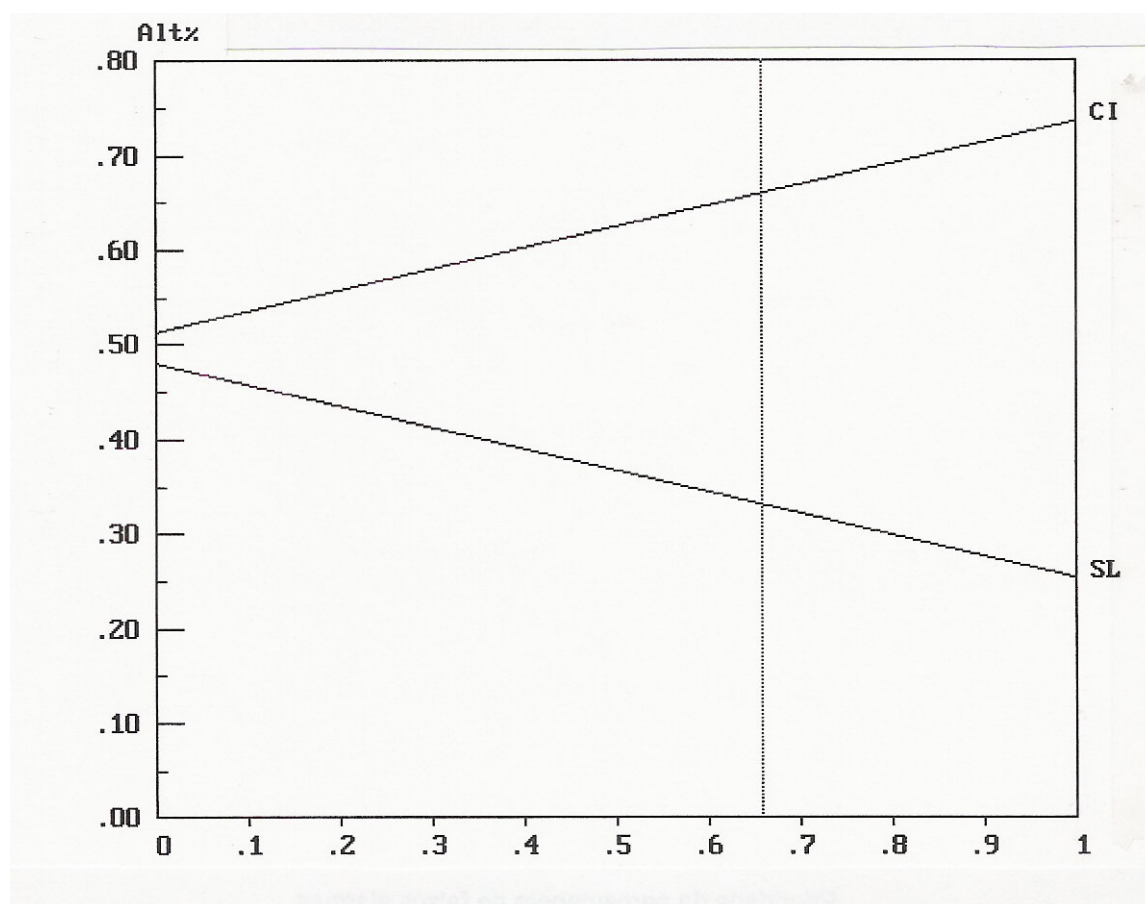


Figura A.7 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério: Percentagem de tempo de alarme

Observando a figura A.8, verifica-se que, qualquer que seja a prioridade da percentagem de tempo de alarme, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, e quando a prioridade da percentagem de tempo de alarme aumenta, os valores dos factores de ponderação afastam-se notoriamente.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



Prioridade da percentagem de tempo de alarme

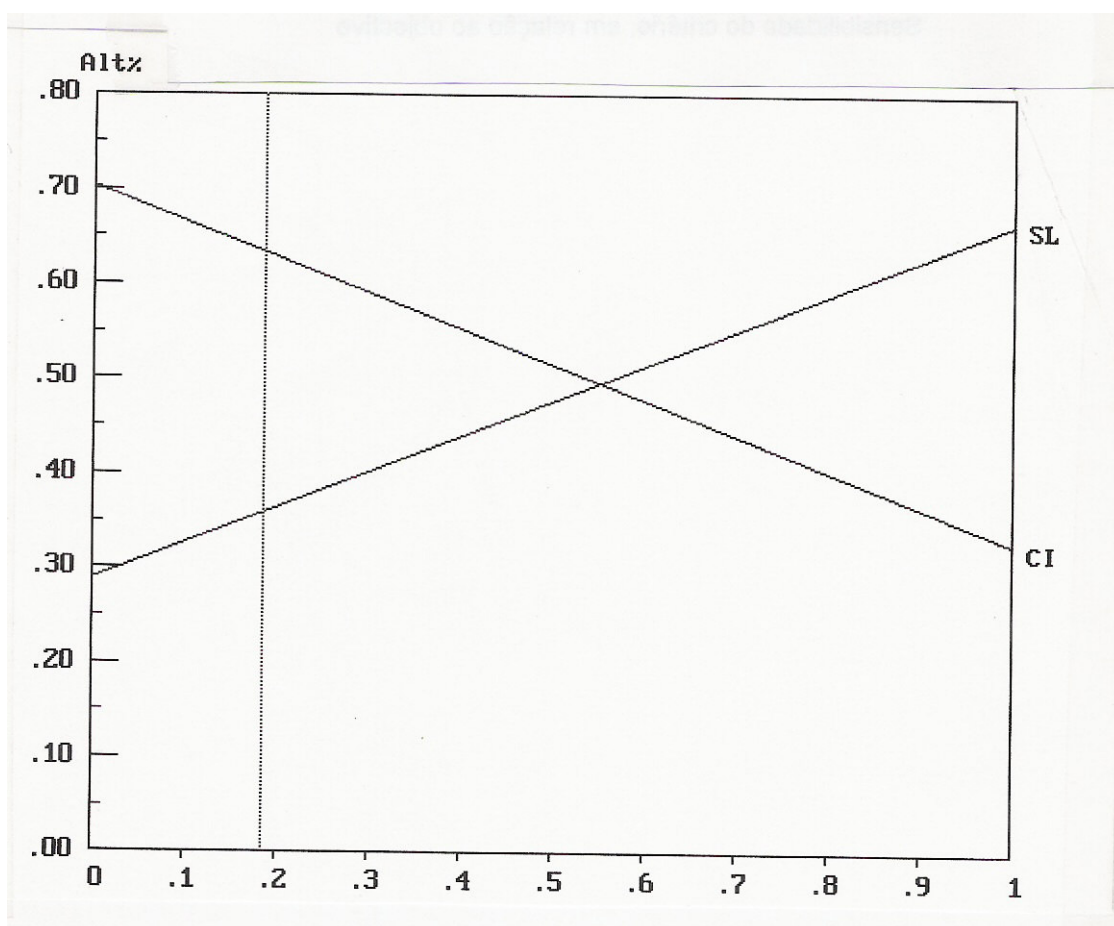
Figura A.8 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

• Situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias

Critério: Percentagem de falhas

Como se pode ver na figura A.9, para valores de prioridade da percentagem de falhas até, aproximadamente, 0.55 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, passando-se o contrário a partir desse valor.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



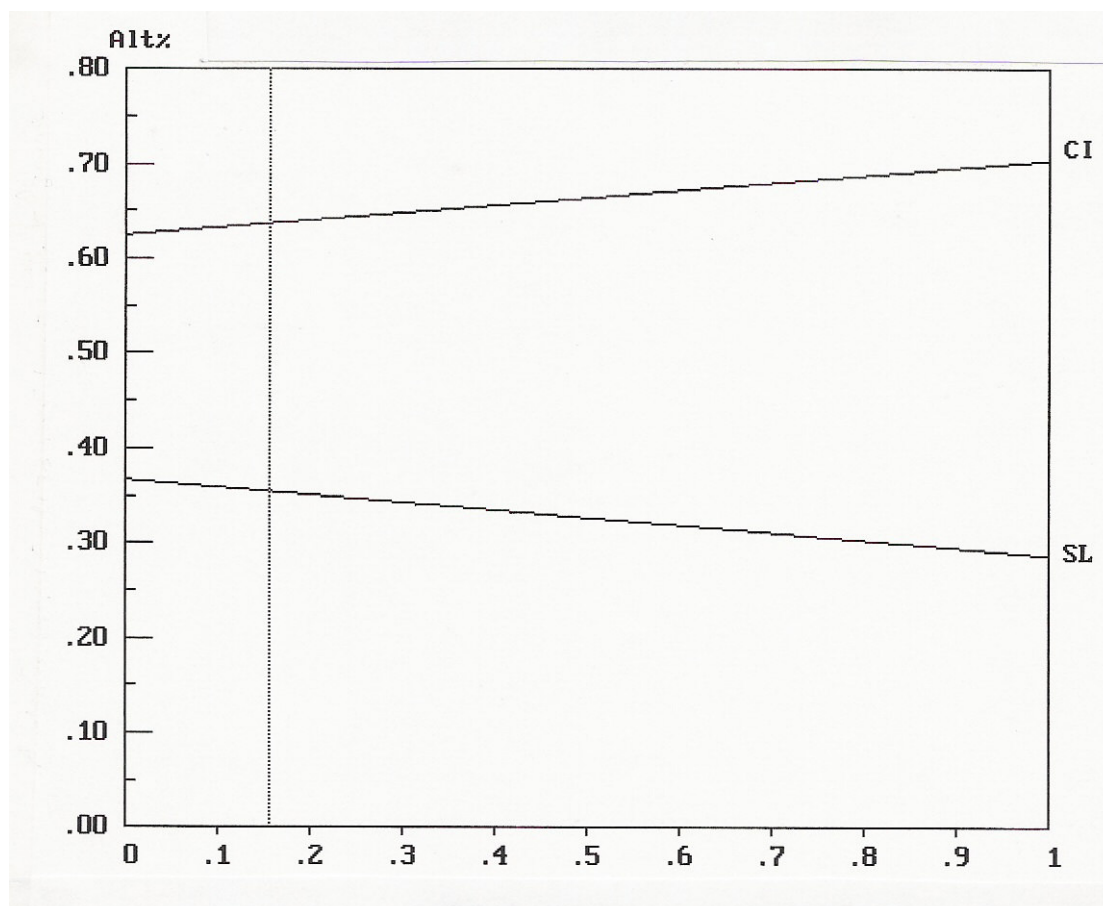
Prioridade da percentagem de falhas

Figura A.9 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias, para o critério percentagem de falhas

Critério: Percentagem de falsos alarmes

A figura A.10 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falsos alarmes, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falsos alarmes aumenta, os valores dos factores de ponderação tendem a afastar-se.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



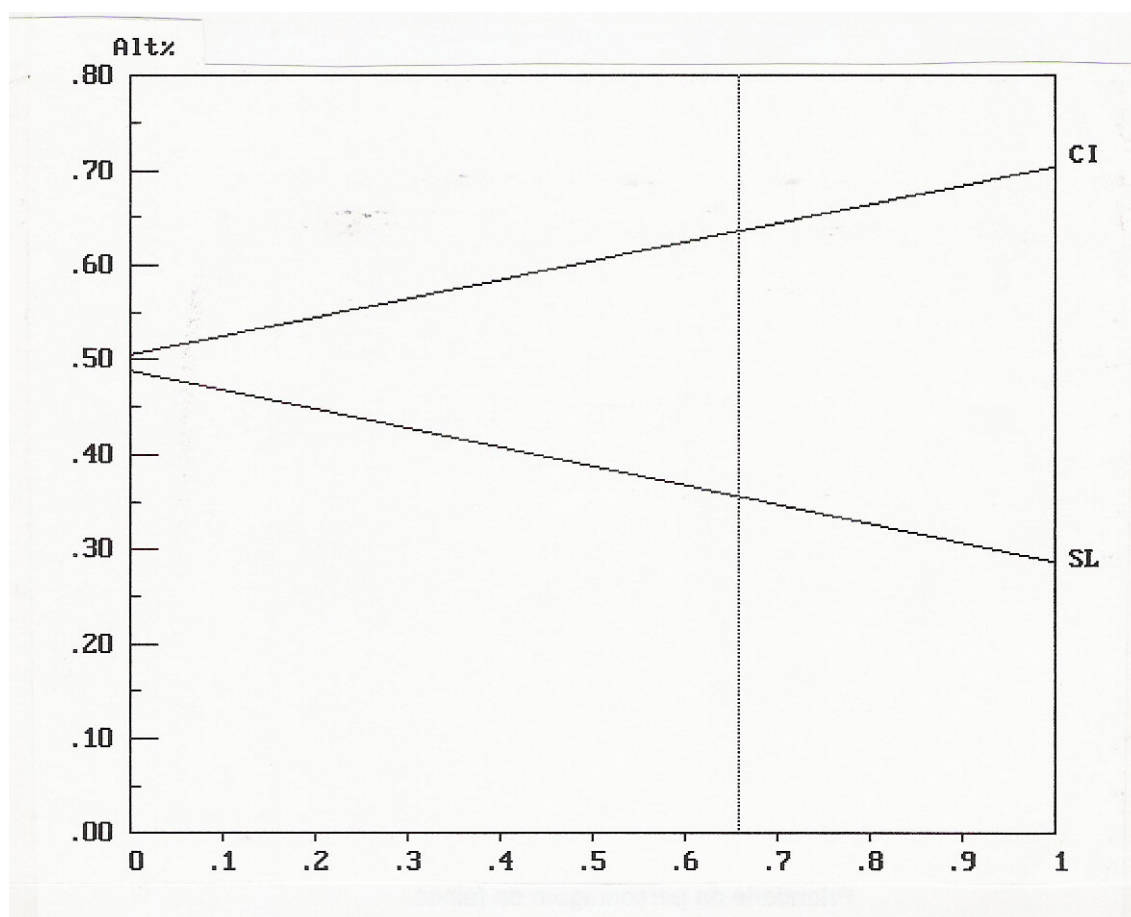
Prioridade da percentagem de falsos alarmes

Figura A.10 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério: Percentagem de tempo de alarme

Análise idêntica à do gráfico A.8.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



Prioridade da percentagem de tempo de alarme

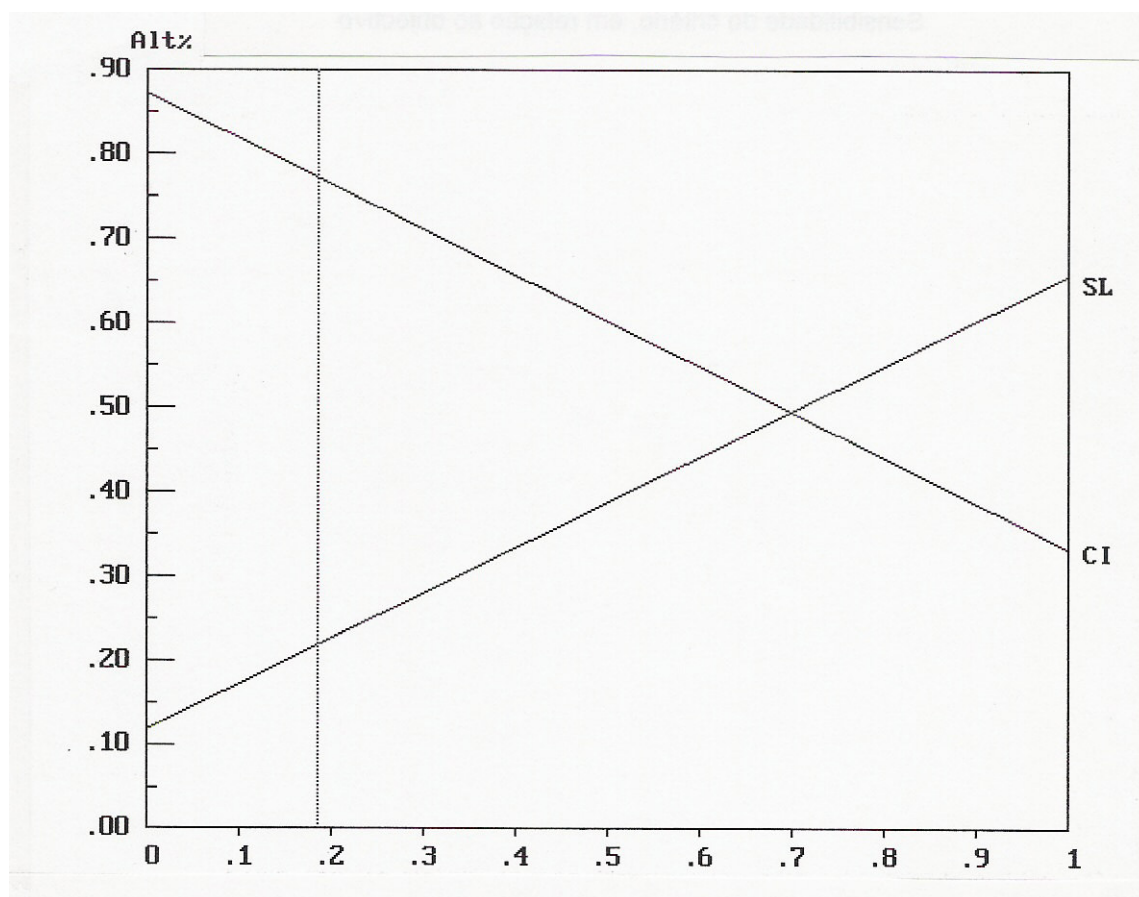
Figura A.11 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 1, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

• Situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias

Critério: Percentagem de falhas

Como se pode ver na figura A.12, para valores de prioridade da percentagem de falhas até, aproximadamente, 0.70 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, passando-se o contrário a partir desse valor.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



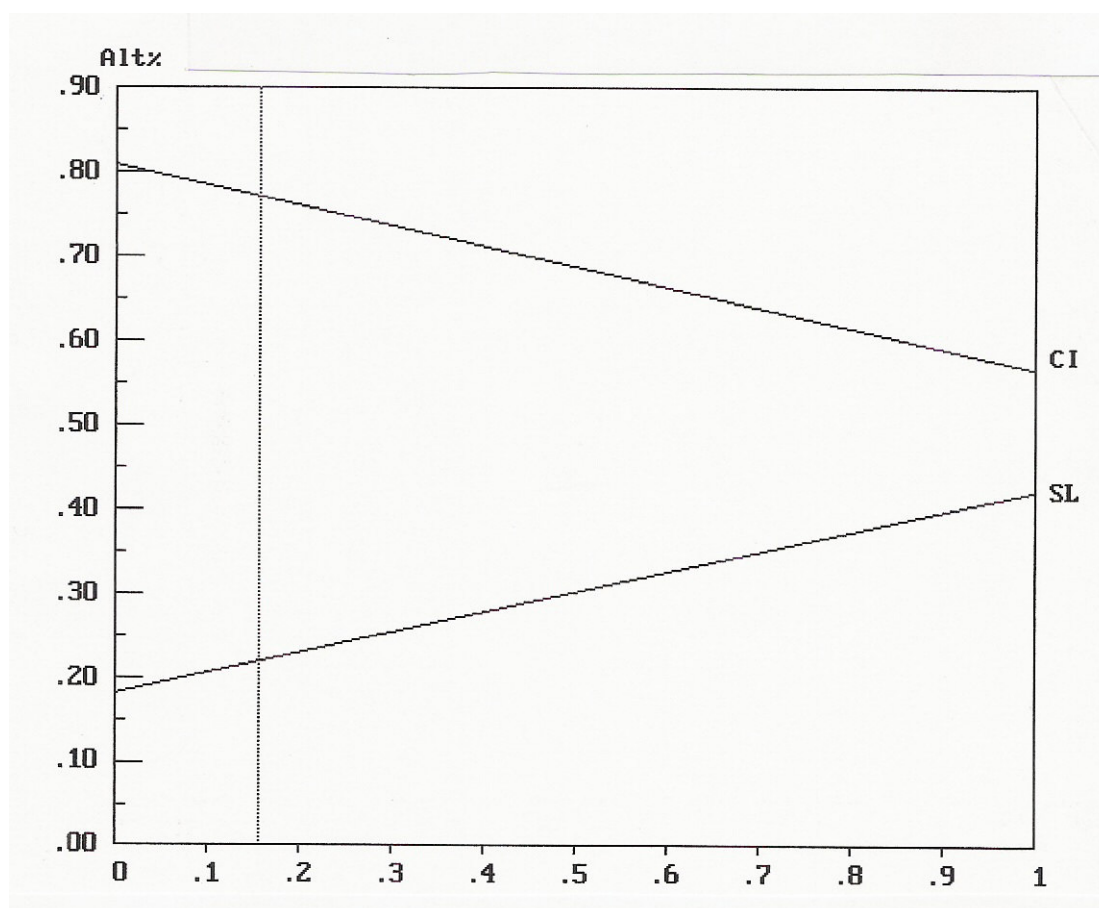
Prioridade da percentagem de falhas

Figura A.12 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de falhas

Critério: Percentagem de falsos alarmes

A figura A.13 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falsos alarmes, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falsos alarmes aumenta, os valores dos factores de ponderação aproximam-se.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



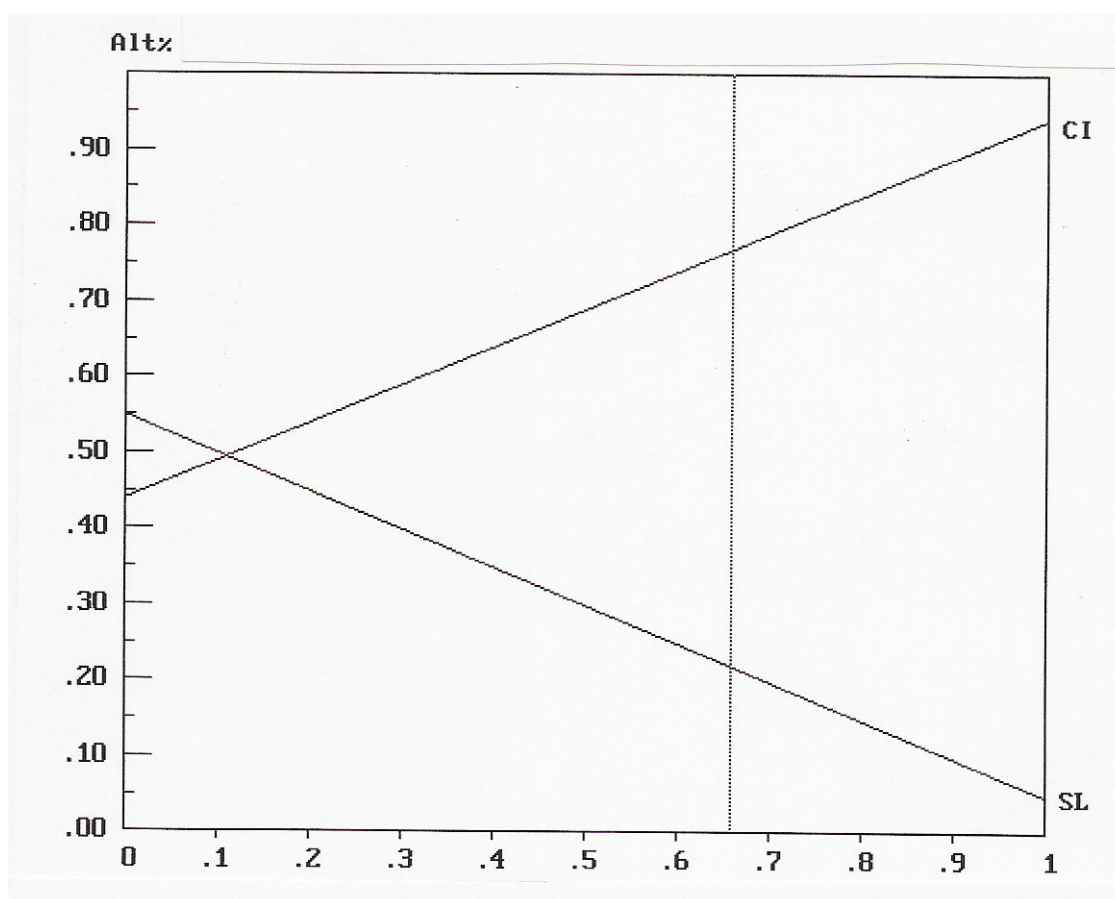
Prioridade da percentagem de falsos alarmes

Figura A.13 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério: Percentagem de tempo de alarme

Como se pode ver na figura A.14, para valores de prioridade da percentagem de tempo de alarme até, aproximadamente, 0.12 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Sismicidade Local é superior ao factor de ponderação do precursor Condições Iniciais, passando-se o contrário a partir desse valor.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



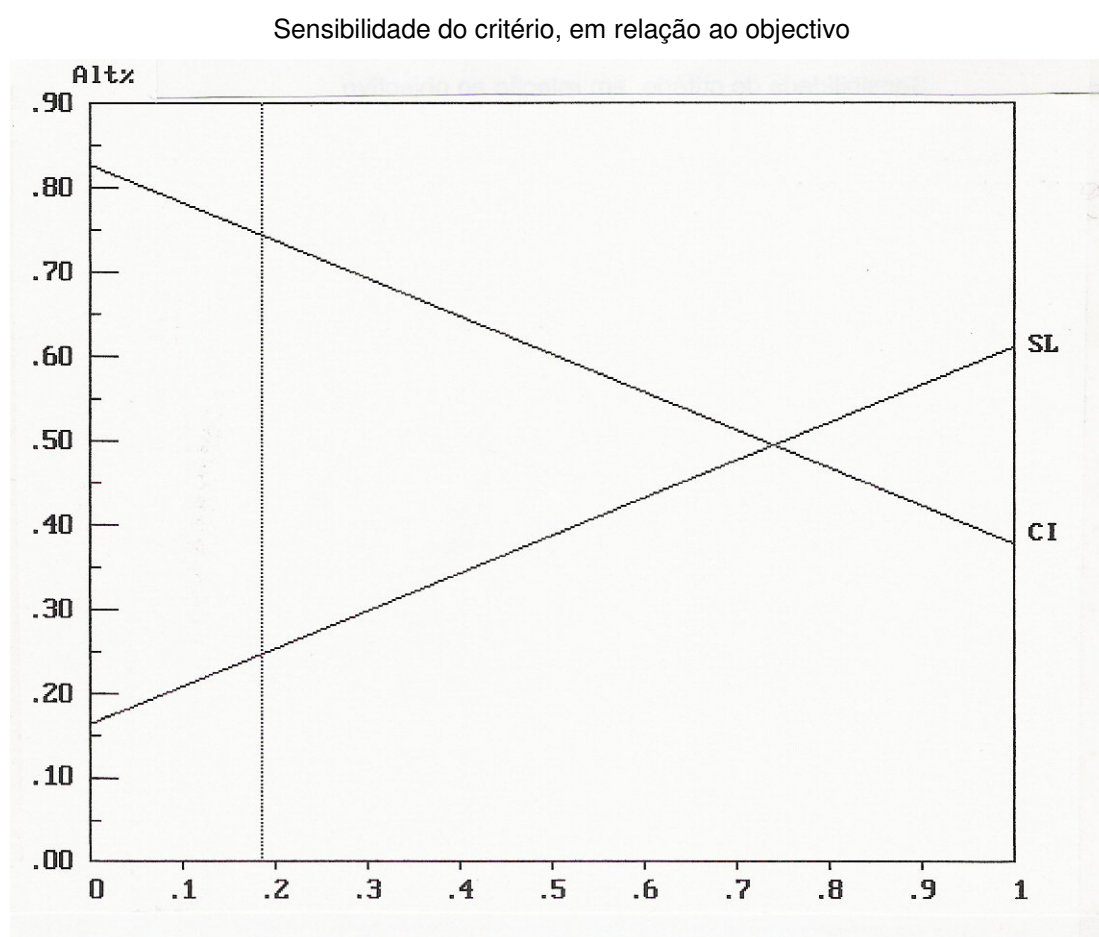
Prioridade da percentagem de tempo de alarme

Figura A.14 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

• Situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias

Critério: Percentagem de falhas

O gráfico representado na figura A.15 apresenta comportam análogo ao da figura A.12. Para valores de prioridade da percentagem de falhas até, aproximadamente, 0.74 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, passando-se o contrário a partir desse valor.

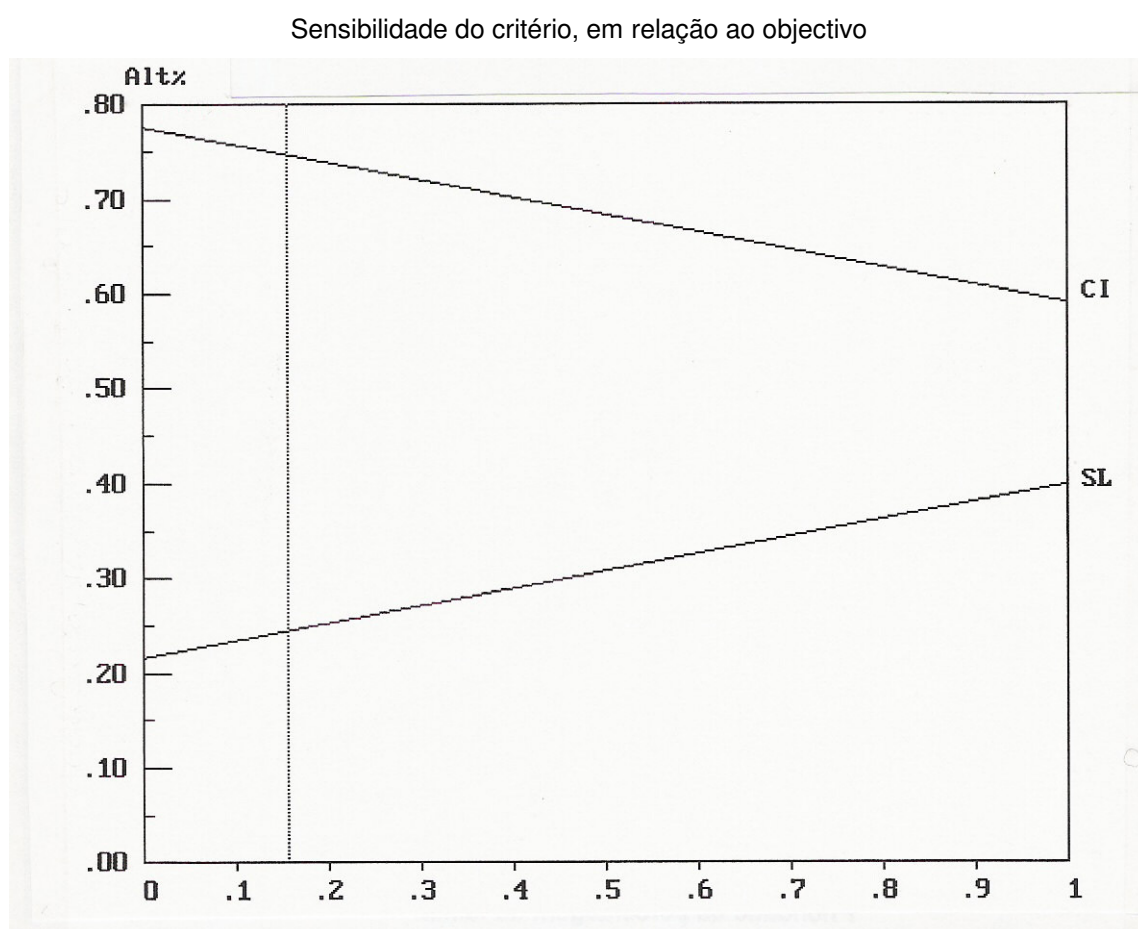


Prioridade da percentagem de falhas

Figura A.15 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias, para o critério percentagem de falhas

Critério: Percentagem de falsos alarmes

A figura A.16 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falsos alarmes, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falsos alarmes aumenta, os valores dos factores de ponderação aproximam-se.



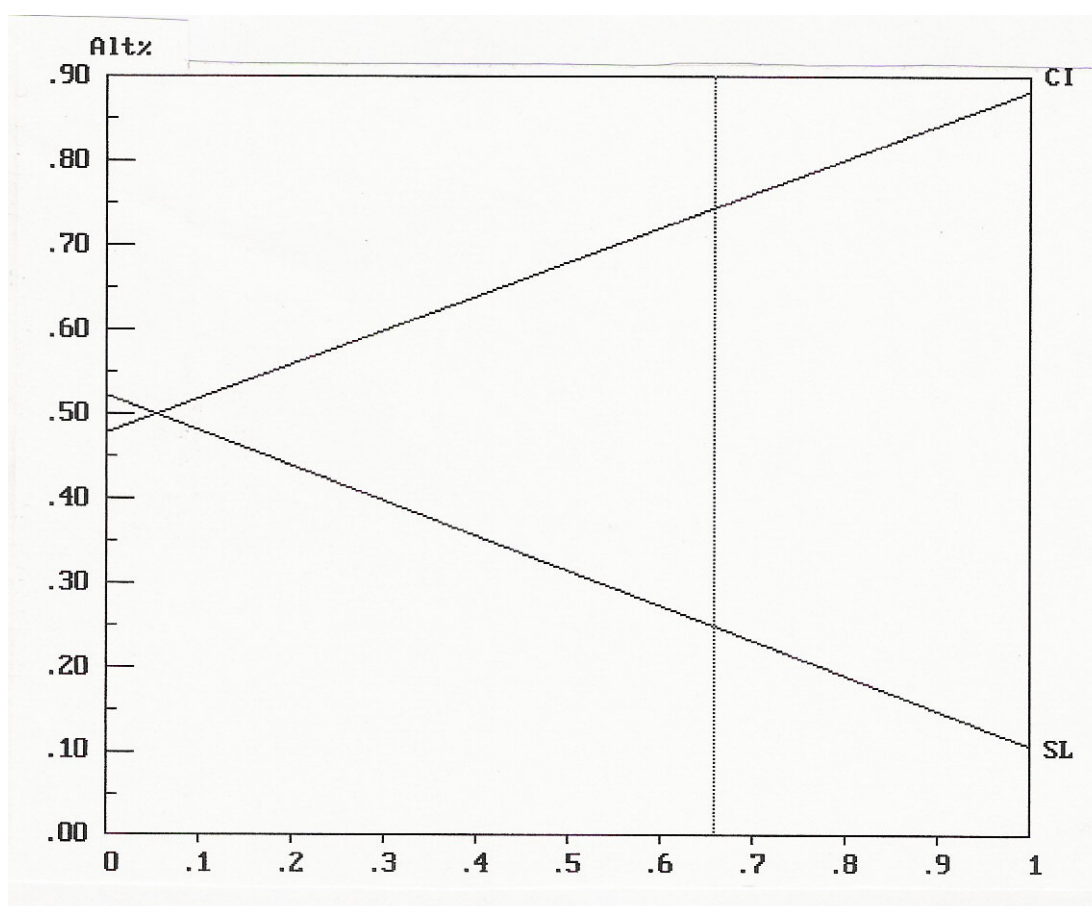
Prioridade da percentagem de falsos alarmes

Figura A.16 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério: Percentagem de tempo de alarme

O gráfico representado na figura A.17 apresenta comportam análogo ao da figura A.14. Apenas para valores de prioridade da percentagem de tempo de alarme inferiores a, aproximadamente, 0.06 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Sismicidade Local é superior ao factor de ponderação do precursor Condições Iniciais.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



Prioridade da percentagem de tempo de alarme

Figura A.17 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 3, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

• Situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias

Critério: Percentagem de falhas

Como se pode ver na figura A.18, para valores de prioridade da percentagem de falhas até, aproximadamente, 0.67 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, passando-se o contrário a partir desse valor.

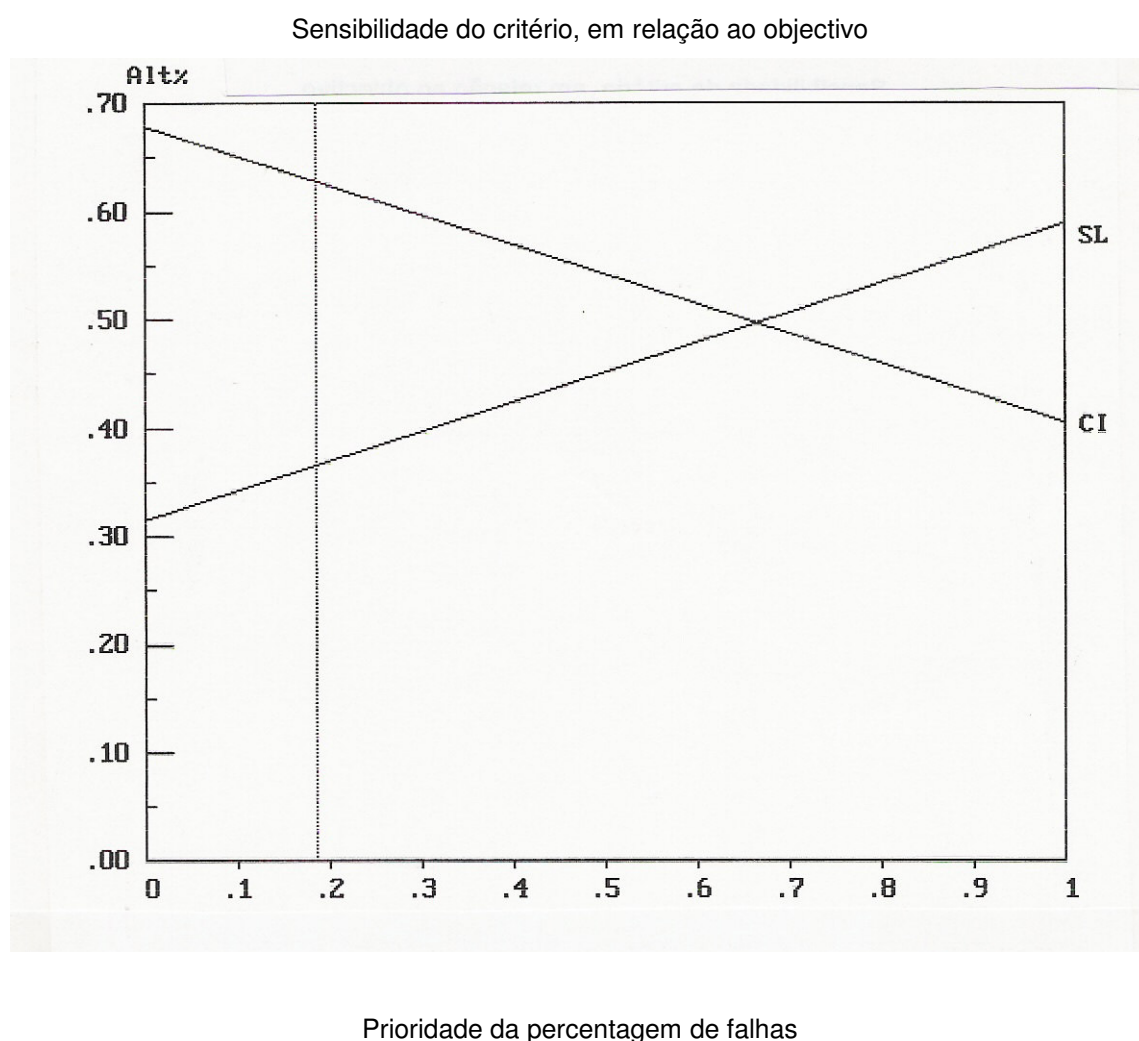
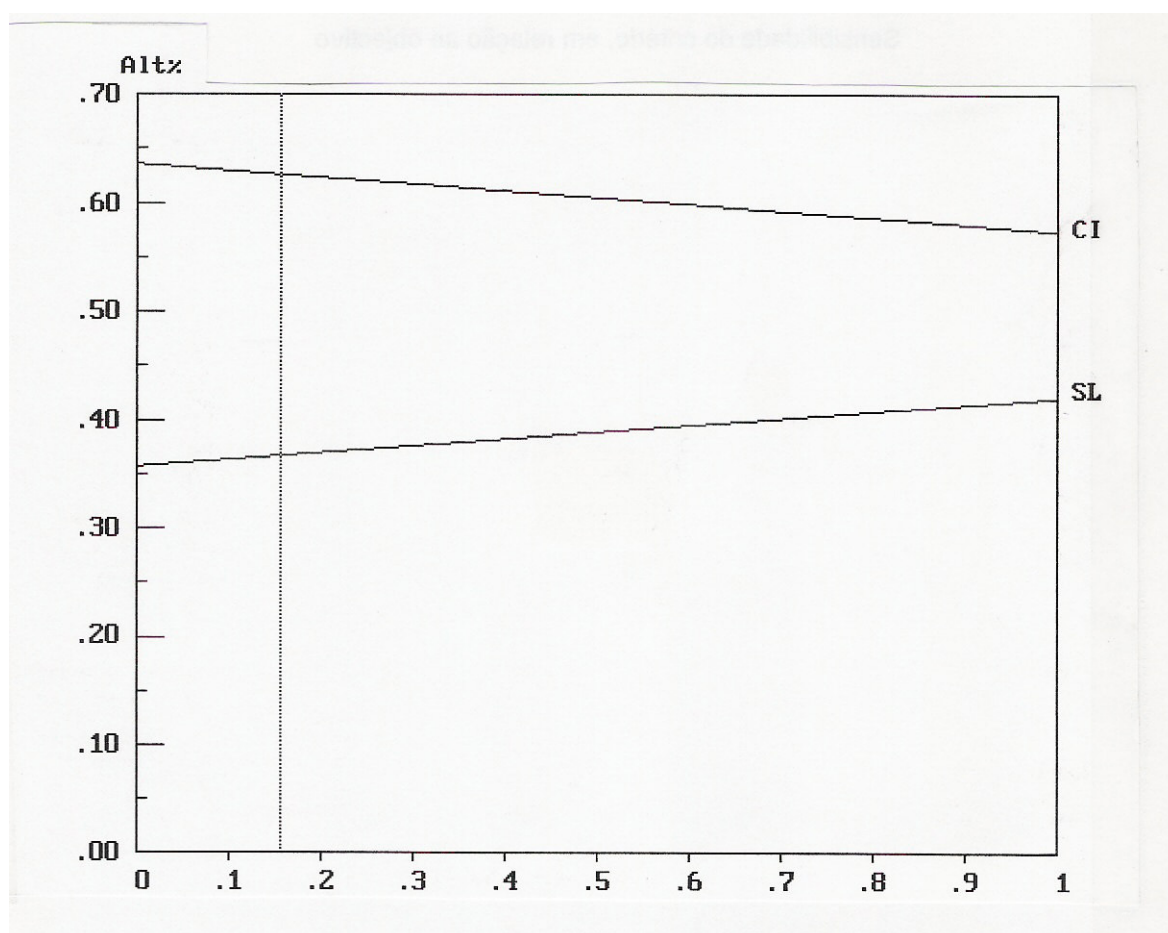


Figura A.18 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de falhas

Critério: Percentagem de falsos alarmes

A figura A.19 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falsos alarmes, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falsos alarmes aumenta, os valores dos factores de ponderação aproximam-se.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



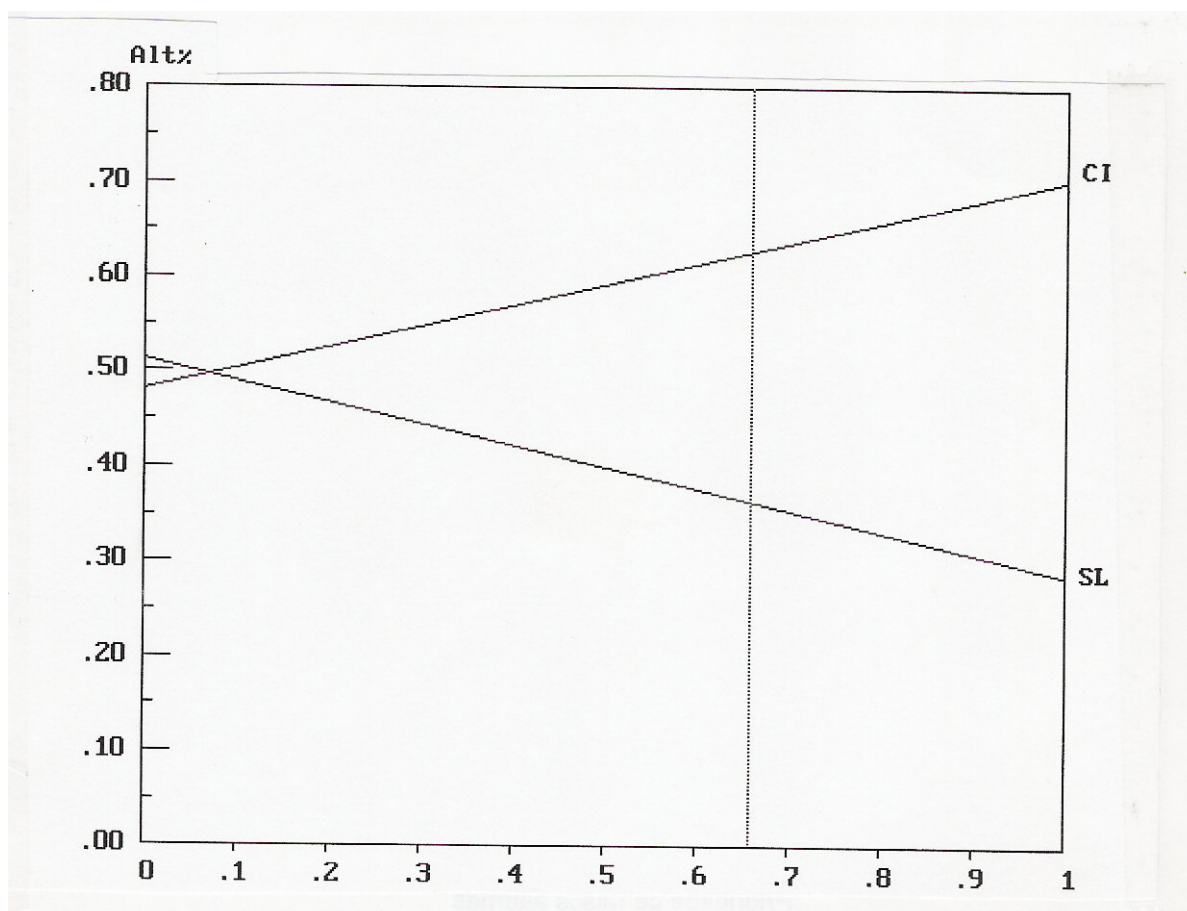
Prioridade de falsos alarmes

Figura A.19 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério: Percentagem de tempo de alarme

O gráfico representado na figura A.20 permite verificar que apenas para valores de prioridade da percentagem de tempo de alarme inferiores a, aproximadamente, 0.08 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Sismicidade Local é superior ao factor de ponderação do precursor Condições Iniciais.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



Prioridade da percentagem de tempo de alarme

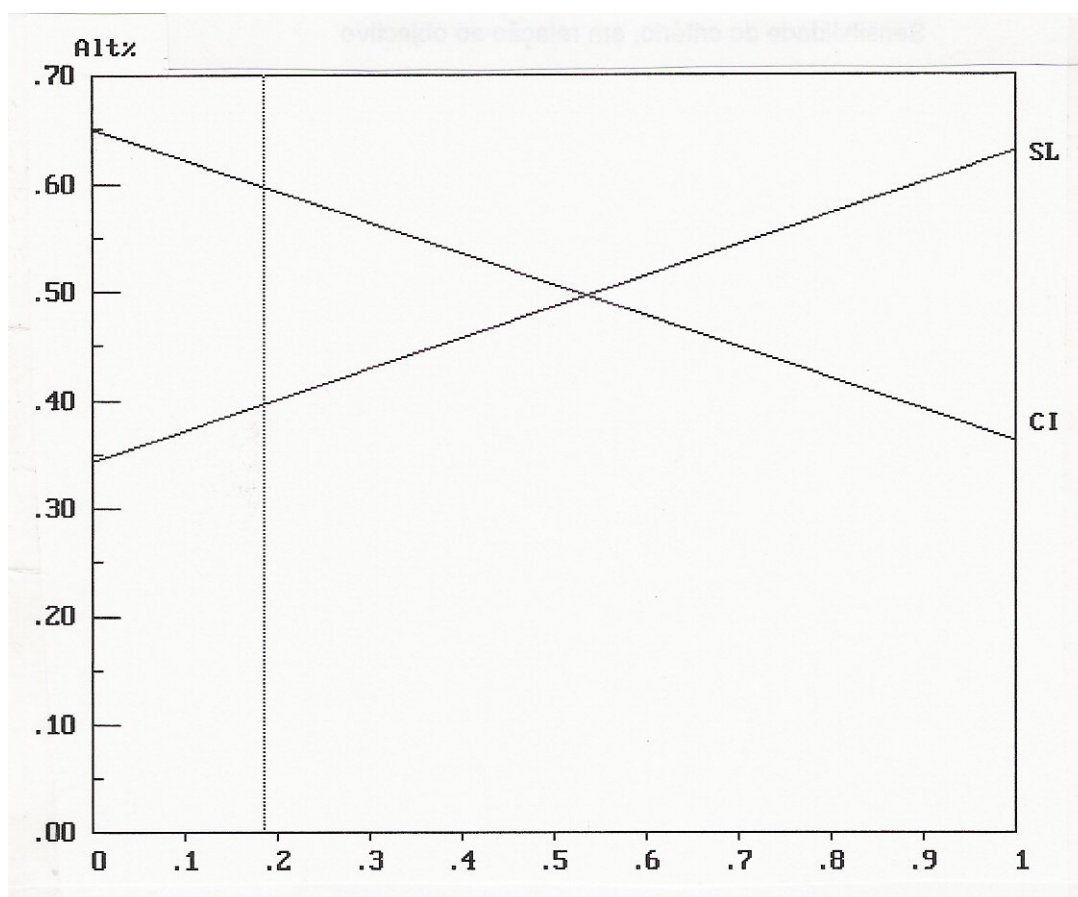
Figura A.20 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

• Situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias

Critério: Percentagem de falhas

O gráfico representado na figura A.21 apresenta comportam análogo ao da figura A.18. Para valores de prioridade da percentagem de falhas inferiores a, aproximadamente, 0.53 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, passando-se o contrário a partir desse valor.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



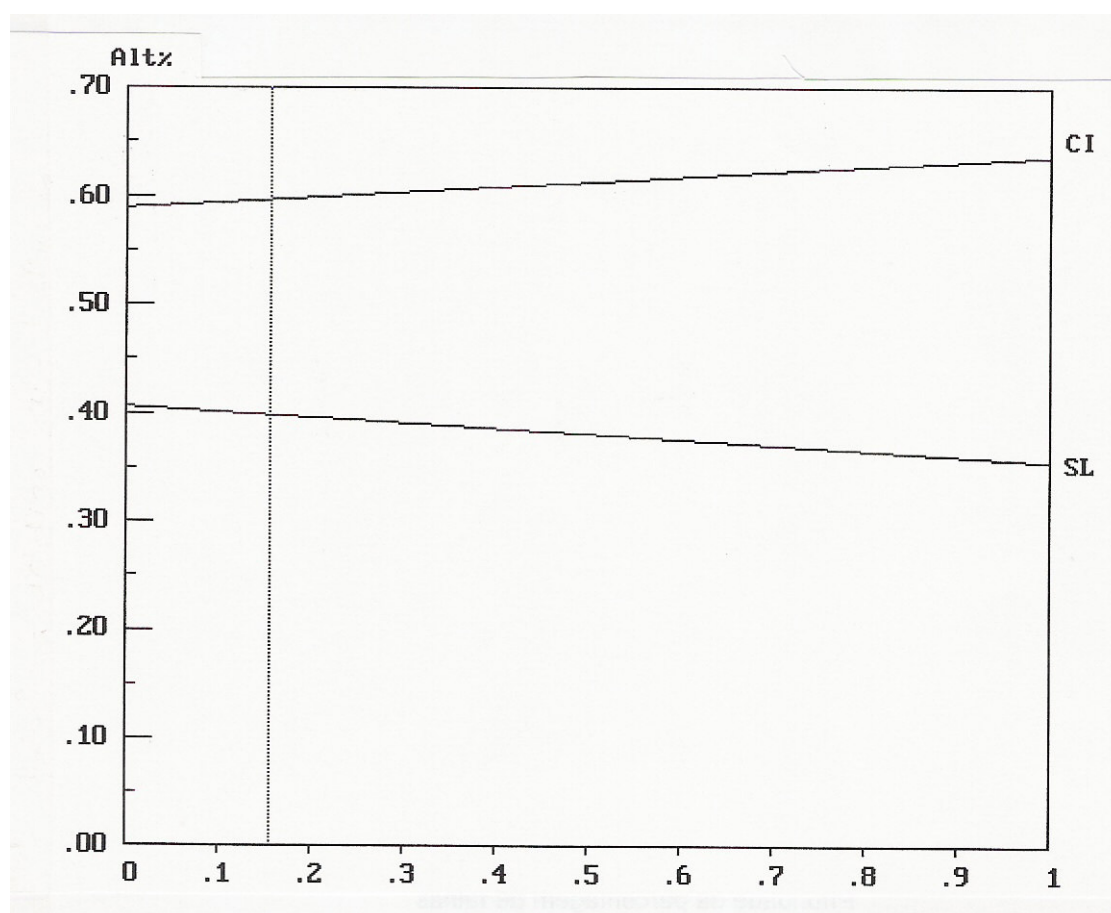
Prioridade da percentagem de falhas

Figura A.21 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, $T_0 = 15$ dias, para o critério percentagem de falhas

Critério: Percentagem de falsos alarmes

A figura A.22 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falsos alarmes, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falsos alarmes aumenta, os valores dos factores de ponderação tendem a afastar-se.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



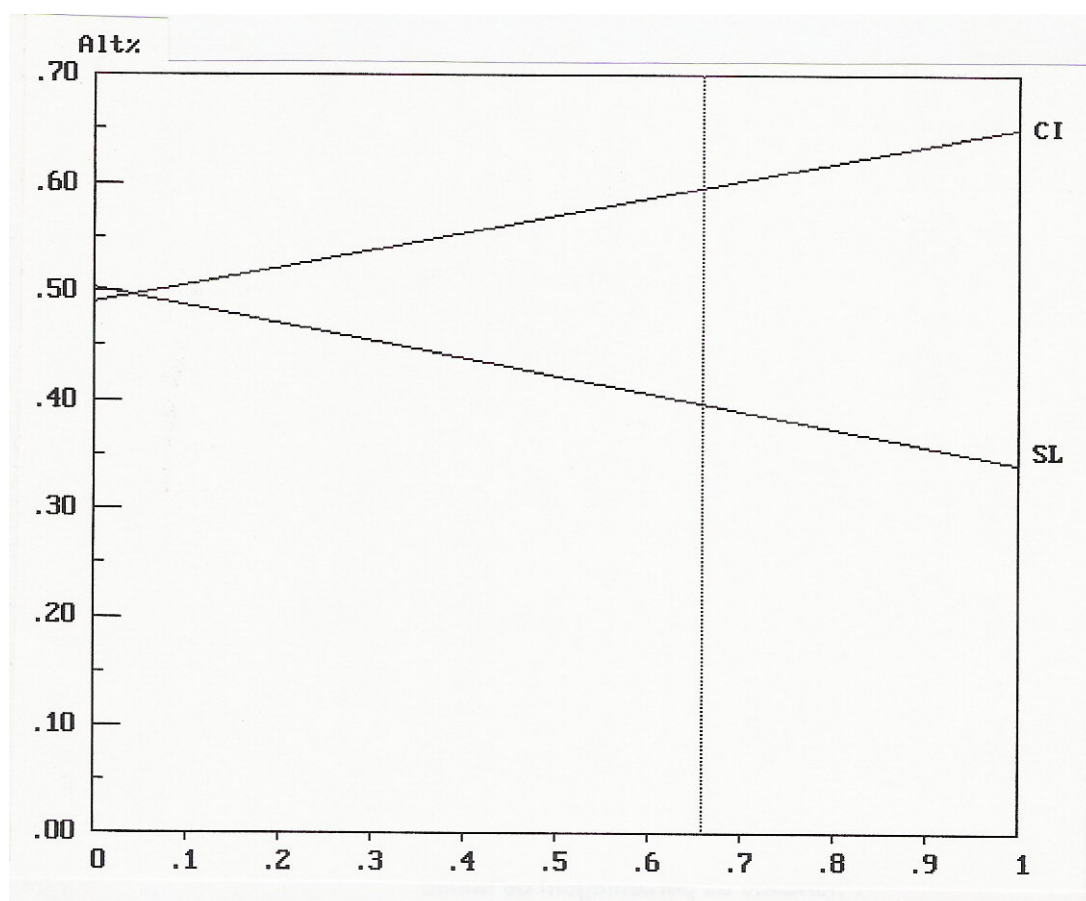
Prioridade de falsos alarmes

Figura A.22 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério: Percentagem de tempo de alarme

O gráfico representado na figura A.23 apresenta comportam análogo ao da figura A.20. Apenas para valores de prioridade da percentagem de tempo de alarme inferiores a, aproximadamente, 0.05 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Sismicidade Local é superior ao factor de ponderação do precursor Condições Iniciais.

Sensibilidade do critério, em relação ao objectivo



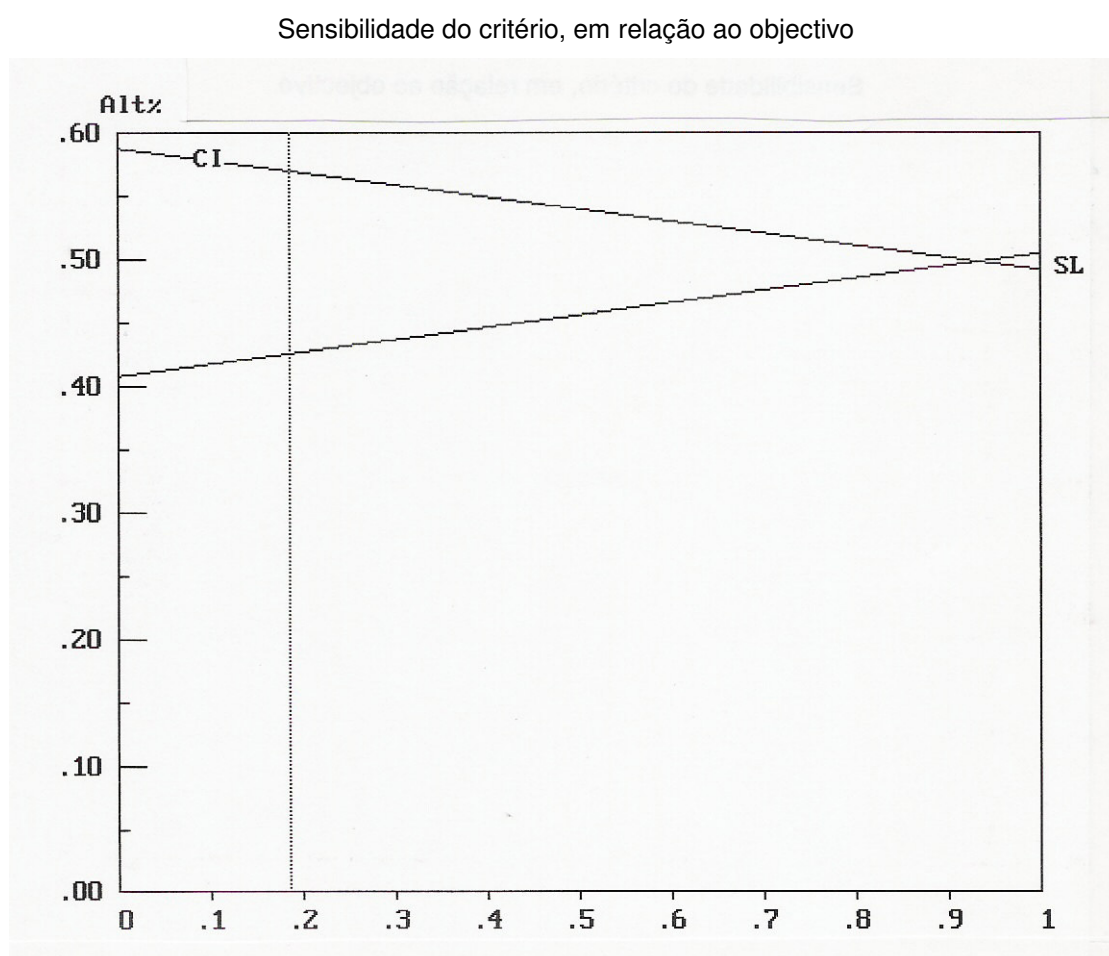
Prioridade da percentagem de tempo de alarme

Figura A.23 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 4, para a região da Andaluzia, T0 = 15 dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

• Situação sísmica nº 6, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias

Critério: Percentagem de falhas

O gráfico representado na figura A.24 permite verificar que apenas para valores de prioridade da percentagem de falhas superiores a, aproximadamente, 0.92 o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Sismicidade Local é superior ao factor de ponderação do precursor Condições Iniciais.



Prioridade da percentagem de falhas

Figura A.24 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 6, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de falhas

Critério: Percentagem de falsos alarmes

A figura A.25 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de falsos alarmes, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falsos alarmes aumenta, os valores dos factores de ponderação tendem a aproximar-se.

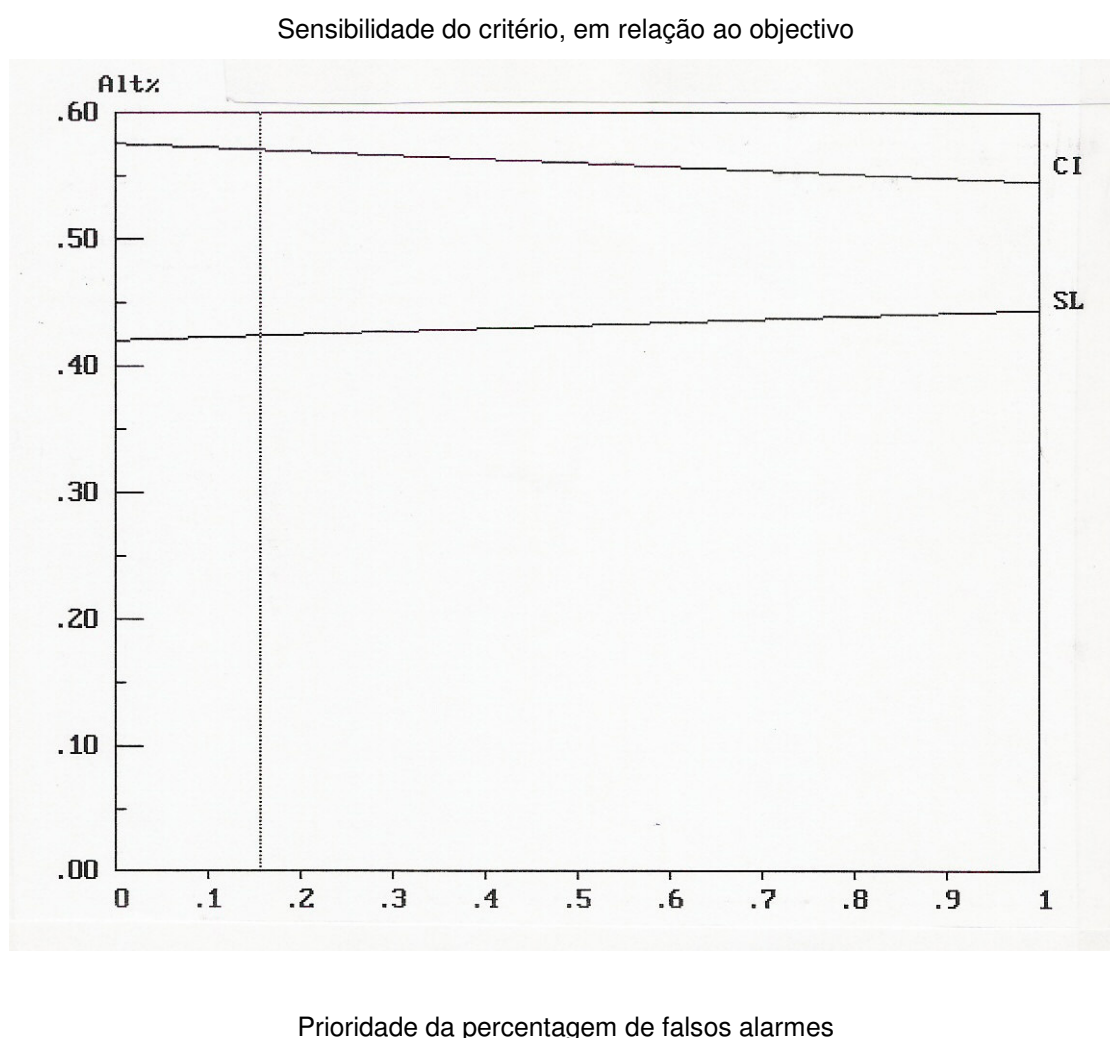


Figura A.25 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 6, para a região da Andaluzia, T0 = 7 dias, para o critério percentagem de falsos alarmes

Critério: Percentagem de tempo de alarme

A figura A.26 permite verificar que, para qualquer valor de prioridade da percentagem de tempo de alarme, o factor de ponderação do grau de alarme do precursor Condições Iniciais é sempre superior ao factor de ponderação do precursor Sismicidade Local, no entanto, quando a prioridade da percentagem de falsos alarmes aumenta, os valores dos factores de ponderação tendem a afastar-se.

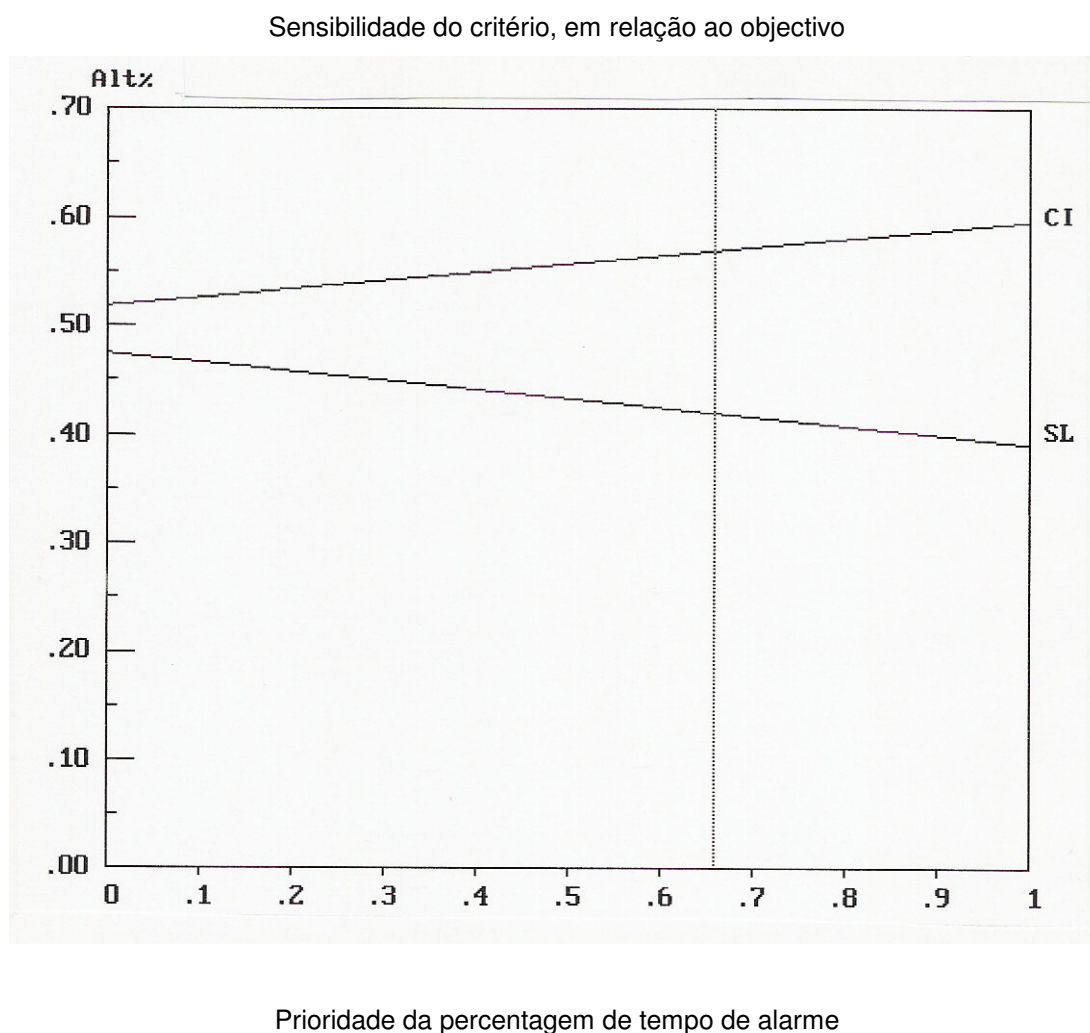


Figura A.26 - Análise de Sensibilidade dos factores de ponderação para os grau de alarme dos precursores Condições Iniciais e Sismicidade Local, da situação sísmica nº 6, para a região da Andaluzia, $T_0 = 7$ dias, para o critério percentagem de tempo de alarme

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ**, Milton ; **STEGUN**, Irene A. (1972) - "Handbook of Mathematical Functions"
Dover Publications, Inc., New York.
- AGNOS**, T ; A. S. **KIREMIDJIAN** (1988) - "A review of earthquakes occurrence models for seismic hazard analysis"
Prob. Eng. Mech., Vol. 3, nº1, 3-11.
- AKI**, K. (1981) - "A Probabilistic syntesis of precursory phenomena, in Earthquake Prediction: An International Review, american Geophysical Union, Washington, D.C., 566-574.
- ALBARELLO**, D.; **FERRARI**, G.; **MARTINELLI**, G. ; **MUCCIARELLI**, M. (1991) - "Well-level variation as a possible seismic precursor: a statistical assessment from Italian historical data"
Tectonophys., 193,4: 385-396.
- ALVES**, E. Ivo (1995) - "Uma abordagem connexionista ao problema da previsão sísmica"
Dissertação de Doutoramento. Centro de Geociências da Universidade de Coimbra.
- CAMPBELL**, K. W.(1982) - "Baysian analysis of extreme earthquakes occurrences. Part I. Probabilistic hazard model "
Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 72 (5), 1705-1869.
- CONOVER**, W. J. (1971) - "Practical Nonparametric Statistics"
Wiley, N. Y.
- CORNELL**, C.A. (1971) - Probabilistic Analysis of Damage to Structures under Seismic Load, in Dinamic Waves in Civil Engineering"
D.A Howell; I. P. Haigh, e C.Taylor, Editors.
Wiley, New York.
- CORNELL**, C. ; **WINTERSTEIN**, R. (1987) - "Temporal and Magnitude dependence in earthquake recurrence models"
Bulletin of Seismological Society of America, 1522-1537.

COSTA, R. A. (1989) - "Modelação do Processo Estocástico Sísmico na Península Ibérica"

Dissertação de Doutoramento. IST-UTL

COSTA, R. A. ; OLIVEIRA, C.A. (1991) - "On the "Intensity-Magnitude" interrelationships in the Ibero-Mogrebi region"

Monografia nº 8

Instituto Geográfico Nacional-Espanha.

COSTA, R. A. ; OLIVEIRA, C. S. (1991) - "Defining seismic zones in the Ibero Mogrebi Region"

Proc. 9 Th. European Conference on Earthquake Engineering - Moscovo, pp 279-288.

COSTA, Carlos A. Bana (Junho/1990) - "MENSOR - Método Multicritério para Segmentação Ordenada"

Investigação Operacional, Vol. 10, nº1, 19-28.

EXPERT CHOICE, (1986) - "Expert Choice" (Manual)

Besed on the Analytic Hierarchy Process

McLean, Virginia

FISHMAN, G.S. (1973) - "Concepts and Methods in Discrete Event Simulation"

Wiley-Interscience, New York.

GASKELL, T.F. (1975) - "A Física da Terra"

Editorial Verbo, Lisboa.

GIANGRANDE, Alessandro (1994) - "How to assess the heights of the criteria in the AHP"-

"Applying Criteria Aid for Decisions to Environmental Management"

M. Paruccini, Luxemburgo.

GRANDORI, Giuseppe ; GUAGENTI, Elisa ; PEROTTI, Federico (August 1988) - "Alarm Systems

Based on a pair of short-term earthquake precursors"

Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 78, 4, pp 1538-1549.

GRANDORI, Giuseppe; GUAGENTI, Elisa (1993) - "Multiprecursor systems based on non independent precursors" Proceedings of the ECE/UN

Seminar on Prediction of Earthquakes. November, 14-18, Lisbon - Portugal.

GREGORI, Geoffrey (1988) - "Decision Analysis"
Pitman Publishing, London.

GROGONO, Peter (1984) - "Programming in Pascal"
Addison-Wesley.

GUAGENTI-GRANDORI, E.; **SCIROCCO** F.(1980) - "A discussion of seismic risk including precursors"
Bull. Seism. Soc. Am, 70, 2245-2251.

GUTENBERG, B.; **RICHTER**, C.F. (1949) - "The Seismicity of the Earth and Associated Phenomena"
Princeton, 19496

GUTENBERG, B.; **RICHTER**, C.F. (1954) - "Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration"
B. S. S. A. 46: 105-145.

GUTENBERG, B.; **RICHTER**, C.F.(1944) - "Frequency of Earthquakes in California"
Bulletin of Seismological Society of America, 34, 185-188.

HASTINGS, N. A. J. ; **PEACOCK**, J. B. (1975) - "Statistical Distributions"
Butterworth & Co. Ltd, 1975.

HILLIER, Frederick S.; **LIEBERMAN**, Gerald J.(1989) - "Introduction to Operations Research "
McGraw-Hill.

HOGARTH, Robin (1980) - "Judgment and choice"
John Wiley & Sons.

JOHNSTON, M. J. S. ; **MORTENSEN**, G. E. (1974) - "Tilt precursors before earthquake ground motion. U. S. G. S. Prof. Paper 1350: 203-220.

KAGAN, Y. Y. ; **KNOPOFF**, L. (1976) - "Statistical search for non-random features of the seismic of strong earthquakes"
Physics of the Earth and Planetary Inter. , Vol. 12, 291-348.

KAGAN, Y. Y. ; **KNOPOFF**, L. (1987) - "Statistical short-term earthquake prediction"
Science, Vol. 236, 1563-1567.

KANAMORI, H. (1972) - "Relation between tectonic stress, great earthquakes and earthquakes swarms"
Tectonophys. 14, 1: 1-12.

KAUFMAN, G.M. ; **THOMAS**, H. (1977) - "Modern Decision Analysis"
Penguin Books.

KNOPOFF, L. (1977) - "Analysis of the theory of extremes applied to earthquake problems"
Journal of Geophysical Research, Vol. 36, 5647-5657.

KNUTH, D. E. (1971) - "The art of Computer Programming"
Vol. 2 seminumerical algorithms
Addison-Wesley, Reading, Mass.

KOSKO, Bart (1994) - "Fuzzy Thinking: the new science of Fuzzy Logic"
Flamingo, HarperCollins Publishers, London.

KRUSE, R. ; **GEBHARDT**, J ; **KLAWONN** F.(1994) - "Foundations of Fuzzy Systems"
John Wiley & Sons.

KUMPEL, H. J. (1991) - "Pore-pressure variation as a precursory phenomenon: the need for and a list of supplementary data"
Tectonophys. 193, 4:377-384.

MARTINS, I.; **MENDES VICTOR**, L. A. (1994) - " Contribuição para o Estudo da Predição Sísmica a Médio Prazo (Aplicação à região Oeste da Península Ibérica)"
Publ. Instituto Geofísico do Infante D. Luis, 23. Lisboa.

MATTEUCIG, G. (1983) - " Il comportamento presismico dei primati (Sindrome di Mercalli)"
Atti X Incontri Internaz. di Ischia.

MILLER, Alan R. (1981) - "Pascal Programs for Scientist and Engineers"
Sybex Inc., USA.

MOOD, Alexander M. ; **GRAYBILL**, Franklin A.; **BOES**, Duane C. (1974) - "Introduction to the theory of statistics"
McGraw-Hill.

- MOORE**, P. G.; Thomas, H.; **BUNN**, D.W.; **HAMPTON**, J. M.. (1979) - "Cases Studies in Decision Analysis"
Penguin Books, 1979.
- MURTEIRA**, B. J. F. (1979) - "Probabilidades e Estatística", Vol. I
McGraw-Hill.
- MURTEIRA**, B. J. F. (1980) - "Probabilidades e Estatística", Vol. II
McGraw-Hill.
- NAYLOR**, Thomas H.; **BALINTFY**, Joseph L.; **BURDICK**, Donald S. (1968) - "Computer Simulation Techniques"- Wiley, 1968.
- OSHIMAN**, N.; **TUNÇER**, M. K.; **HONKURA**, Y. ; **BARIS**, S. **YAZICI**, O. ; **ISICKARA**, A. M. (1991) -
"A strategy of tectonomagnetic observation for monitoring possible precursors of earthquake
in the western part of the North Anatolian Fault Zone", Turkey, Tectonophys., 193, 4: 359-368.
- PIDD**, Michael (1984) - " Computer Simulation in Management Science "
John Wiley & Sons Ltd.
- PRESS**, F, (1980) - "Earthquake Prediction. Sci. Am. Sp. Issue "Earthquakes and Volcanoes", 30-39.
- PURCARU**, George ; **BERCKHEMER**, Hans (1984) - "Patterns of Occurrence of Large Earthquakes
in Mediterranean Region"
Terra Scientific Publishing Company (Terrapub), Tóquio.
- PURCARU**, George (1988) - "Probabilistic Approach for Predicting the Occurrence Time of a future
Earthquake Using Precursors as Symptomatic Phenomena " Institute of Meteorology
and Geophysics, J. W. Goethe University, Feldbergstr. 47, 6000 Frankfurt/Main, F. R.
Germany.
- RABINOWITZ**, Nitzan ; **ECK**, T. V. (1988) - "A note of the fuzzy set theory concept, with an
application to seismic hazard analysis"
Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 4, 1603-1616.
- RAIFFA**, H. (1970) - "Decision Analysis: Introductory Lectures on Choice under Uncertainty"
Addison-Wesley.

RAVINDRAN, A. ; PHILLIPS, Don T.; SOLBERG, James J. (1987) - "Operations Research "
John Wiley & Sons Ltd.

RIKITAKE, T. (1976) - "Earthquake prediction"
Elsevier. Amsterdam.

RIVETT, Patrick (1980) - "Model Building for decision Analysis"
John Wiley & Sons.

RODRIGUES, M. Cecília M.; COSTA, Ruy A.(1997) - "Estudo comparativo da influência das condições iniciais num modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica"
Investigação Operacional, Nº1 Vol. 17

RODRIGUES, M. Cecília M.; COSTA, Ruy A.(1998) - "Estudo da influência de condições iniciais, geradas aleatoriamente, num modelo de simulação do processo de ocorrências sísmicas na Península Ibérica"
Submetido para publicação, e em fase de revisão na revista Investigação Operacional.

ROSENHEAD, J.(1990) - "Rational Analysis for a Problematic World"
John Wiley & Sons.

ROY, Bernard (1985) -"Méthodologie Multicritère d' Aide à la Decision"
Économica.

SAATY, T. (1990) - "Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process" , Vol. 1 of AHP series Expert Choice, Inc.

SABH, M. I.; MURTY, T. S. ; VENKATESH, S (1994) - "Recent Studies in Geophysical Hazards"
Kluwer Academic Publishers.

SADOVSKY, M.A e NERSESOF, S.K e LATYNINA, L. A e LUKK, A.A e SEMENOV, A.N e SIMBIREVA, I.G e ULOMOV, V.I. (1972) - "The Processes preceding earthquakes in some regions of Middle Asia"
Tectonophys, 14, 3/4: 295-308

SCHALLER, Jean-Pierre (1991) -"Multiple Criteria Decision Aid under incomplete information : A partial Aggregation Method based on the theory of Hints"

Tese apresentada à Faculté des sciences économiques et sociales de l' Université de Fribourg (Suiça) para a obtenção do grau de Doutor
Éditions Payot Lausanne.

SCHILLER, Roland (1984) - "Como a China previu o terramoto de Haicheng"
Seleccções do Reader's Digest, Janeiro de 1998.

SIEGEL, Sidney (1975) - "Estatística não paramétrica"
McGraw-Hill.

SOUSA, M.L.; **MARTINS**, A.; **OLIVEIRA**, C.S: (1992) - "Compilação de Catálogos Sísmicos na Região Ibérica"
Relatório 36/92 - NDA, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

SOUSA, M.L.; **OLIVEIRA**, R.C.; **OLIVEIRA**, C.S: (1997) - "Análise probabilística da casualidade sísmica em Portugal Continental"
Investigação Operacional, Nº1, Vol. 17.

TERANO, Toshiro e **ASAI**, Kiyoji (1992) - "Fuzzy Systems Theory and its Applications"
Academic Press.

TUCKER, Brian E. ; **ERDIK** M.; **HWANG**, Christina N.(1994) - "Issues in Urban Earthquake Risk"
Kluwer Academic Publishers.

VINCKE, Philippe (1992) - "Multicriteria Decision-aid"
John Wiley & Sons.

YAGAR, Ronald R e **FILEV**, Dimitar P. (1994) - "Essentials of Fuzzy Modelling and Control"
John Wiley & Sons.

ZIMMERMANN, H. J. (1991) - "Fuzzy Set Theory and its Applications"
Kluwer academic Publishers.